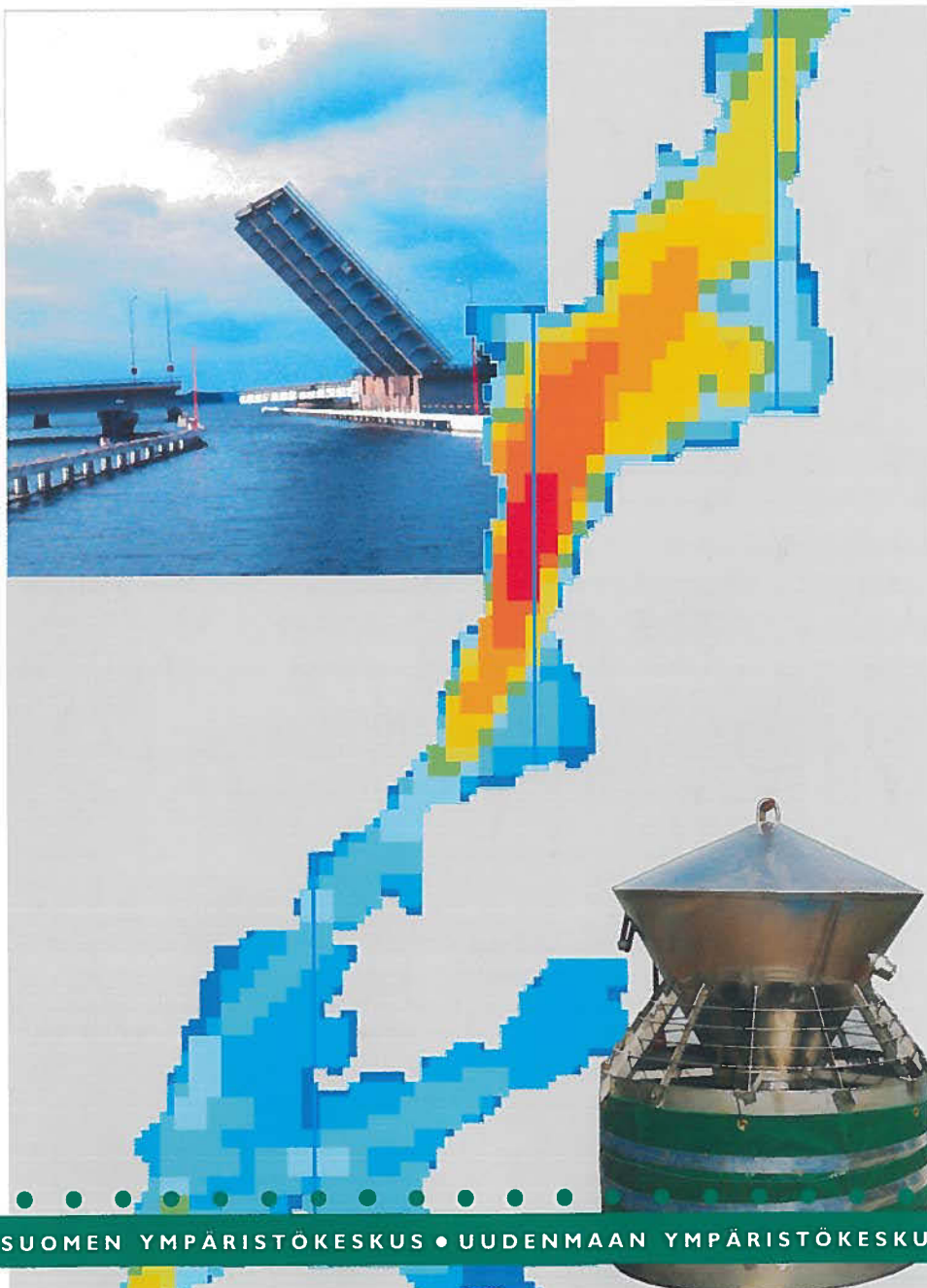




YMPÄRISTÖN-  
SUOJELU

# Pohjanpitäjänlahden syvänteessä vuosina 1995 ja 1996 toteutettu hapetuskokeilu

- veden vaihdunta sekä happi- ja suolataseet





Olli Malve, Markku Virtanen, Leena Villa,  
Mauri Karonen, Heidi Åkerla, Anna-Stiina Heiskanen,  
Kalle-Matti Lappalainen ja Ralf Holmberg

Pohjanpitäjänlahden syvänteessä  
vuosina 1995 ja 1996  
toteutettu hapetuskokeilu

- veden vaihdunta sekä happi- ja suolataseet

HELSINKI 2000



ISBN 952-11-0644-1  
ISSN 1238-7312

Kansikuvat:  
Tammisaaren silta, A.-S. Heiskanen.  
Pohjanpitäjänlahden syvyyskartta, M. Virtanen.  
Hapetuspumppu, K.-M. Lappalainen  
Kansikuvan sommittelu: S. Vuoristo ja A. Malve

Sivutaitto: DTPage Oy  
Paino: Oy Edita Ab  
Helsinki 2000



# Alkusanat

Tässä työssä on selvitetty Pohjanpitäjänlahden happitilanteeseen vaikuttavia tekijöitä ja erityisesti vuosina 1995 ja 1996 toteutetun hapetuskokeilun vaikutuksia. Työstä vastasivat pääosin tutkimusryhmän jäsenet Olli Malve Suomen ympäristökeskuksesta, Markku Virtanen YVA Oy:stä sekä Mauri Karonen, Leena Villa ja Heidi Åkerla Uudenmaan ympäristökeskuksesta.

Tutkimuksessa käytetty vesistöseuranta-aineisto perustuu Helsingin yliopiston Tvärminnen eläintieteellisen aseman, Länsi-Uudenmaan vesi- ja ympäristö ry:n sekä Uudenmaan ympäristökeskuksen vuosina 1995-1997 keräämiin ja analysoimiin vesinäytteisiin, Tvärminnen eläintieteellisen aseman ja Uudenmaan ympäristökeskuksen CTD-luotauksiin, Tvärminnen eläintieteellisen aseman tuulihavaintoihin, Merentutkimuslaitoksen vedenkorkeusrekisterin tietoihin sekä Suomen ympäristökeskuksen virtaama- ja valuntarekisterien tietoihin. Suomen ympäristökeskus mittasi meriveden virtauksia, lämpötilaa ja sähkönjohtokykyä Tammisaaren ja Vitsandin salmissa sekä Tvärminnessä. Suomen ympäristökeskus määrittä myös koko tutkimusaineiston perusteella meriveden sisäänvirtauksen määrän, ajoittumisen, niihin johtavat tapahtumat sekä alusveden suola- ja happitaseet. YVA Oy vastasi virtausten ja vedenlaadun 3D-mallinnuksesta.

Raportissa esitetty virtauksia, veden vaihduntaa, happitilaa ja kerrostumista koskevan aineiston analyysi ja tulkinta sekä taselaskelmia ja -malleja koskevat osat ovat Olli Malveen kirjoittamia. Olli Malve toimi myös julkaisun editorina. 3D-mallinnusta koskevat osat ovat Markku Virtasen kirjoittamia. Ravinne-, hiili- ja klorofylli a-aineistoa sekä taustatietoja koskevat osat on kirjoitettu Uudenmaan ympäristökeskuksessa. Tutkimusryhmän lisäksi kirjoitustyöhön osallistui Anna-Stiina Heiskanen Suomen ympäristökeskuksesta (vuoden 1992 hiukkasmaisen aineksen pitoisuus- ja sedimentaatiohavainnot luvuissa 2.4.1, 3.1.2 ja 4.3), Ralf Holmberg Länsi-Uudenmaan vesi- ja ympäristö ry:stä (luku 1.1) sekä K. Matti Lappalainen Vesi-Eko Oy:stä (luku 2.3).

Tutkimusryhmä kiittää kaikkia yhteistyötahoja, erityisesti Tvärminnen eläintieteellistä asemaa ja Merentutkimuslaitosta, tuloksellisesta yhteistyöstä. Jouko Pokkia kiitämme eläintieteellisen aseman aikaisemman havaintoaineiston toimittamisesta ja virtausmittausten järjestelyistä. Svante Degerholmille, Juhani Henttoselle, Torsten Sjölundille ja Heikki Susimalle osoitamme kiitokset avusta virtausmittareiden asennuksissa ja nostoissa. Kimmo Alvia, Kati Mannia, Janne Soinista ja Sirpa Takaloa kiitämme osallistumisesta aineiston käsittelyyn. Lisäksi kiitämme laboratorio- ja kenttähenkilöstöä mittavan aineiston tuottamisesta. Kaikkia käsikirjoituksen lukeneita kiitämme kommentteista ja korjausehdotuksista.



# Sisällys

<b>Alkusanat .....</b>	<b>3</b>
<b>I Johdanto .....</b>	<b>7</b>
1.1 Alueen yleiskuvaus .....	7
1.2 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet .....	8
<b>2 Aineisto ja menetelmät .....</b>	<b>9</b>
2.1 Tutkimusalue ja sääolosuhteet .....	9
2.1.1 Morfologia .....	9
2.1.2 Hydrologia .....	11
2.1.3 Sääolot .....	12
2.2 Kuormitus .....	13
2.2.1 Mustionjoki .....	13
2.2.2 Jätevesikuormitus .....	15
2.3 Hapetuspumppujen toiminta .....	16
2.4 Näytteet ja CTD-luotaukset .....	16
2.4.1 Vesi- ja sedimentaationäytteet .....	16
2.4.2 CTD-luotaukset .....	17
2.5 Virtausmittaukset ja mittausaineiston käsittely .....	17
2.5.1 Virtausmittaukset .....	17
2.5.2 Tilastollisten riippuvuuksien määrittäminen .....	20
2.5.3 Suolaisuuden ja tiheyden muunnoskaavat .....	22
2.5.4 Virtauksen nopeus- ja suuntajakauma .....	23
2.5.5 Vesitaseen laskenta .....	24
2.5.6 Tiheysvirtauksen ja rannikkoalueen syvänveden kumpuamisen mittaaminen syksyllä 1997 .....	25
2.6 Happi- ja suolataseiden laskenta .....	26
2.6.1 Taseiden komponentit .....	26
2.6.2 Tasemalli .....	27
2.7 Virtausten ja veden laadun kolmiulotteinen laskenta .....	29
2.7.1 Laskentamenetelmät ja niiden soveltaminen .....	29
2.7.2 Laskennan varmistukset .....	32
2.7.3 Tarkastelualueen, -olojen ja tilanteiden syöttö laskentaan .....	33
2.7.4 Tulo-, reuna- ja alkupitoisuudet .....	36
2.7.5 Pohjakertymien hapenkulutus .....	37
2.7.6 Biomassan hajoamisen aiheuttama (sekundäärinen) hapenkulutus .....	38
2.7.7 Vajoaminen, pohjalle kertyminen ja pohjalta vapautuminen ...	39
2.7.8 Kuluminen ja ilmastuminen .....	41
<b>3 Tulokset .....</b>	<b>43</b>
3.1 Vedenlaatu tutkimusalueella .....	43
3.1.1 Alusveden happitila ja kerrostuminen vuosina 1995 ja 1996 .....	43
3.1.2 Orgaaninen hiili .....	58
3.1.3 Klorofylli a ja ravinnepitoisuudet .....	61
3.2 Virtaukset ja veden vaihdunta .....	72
3.2.1 Virtausnopeus ja sitä selittävät muuttujat .....	72
3.2.2 Lämpötilan, suolaisuuden ja tiheyden vaihtelu .....	75
3.2.3 Virtauksen suunta- ja nopeusjakaumat .....	78
3.2.4 Pohjanpitäjänlahden vaihdunta Tammisaaren salmissa .....	80
3.2.5 Tilastolliset riippuvuudet .....	83

3.2.6	Kumpuaminen rannikkoalueella ja vaihdunta Tammisaaren ja Vitsandin salmissa syksyllä 1997 .....	90
3.3	Pohjanpitäjänlahden happi- ja suolataseet .....	91
3.3.1	Suola- ja happitasemallien kalibrointi .....	91
3.3.2	Alusveden suola- ja happitaseiden komponentit .....	94
3.4	Virtausten, kulkeutumisen ja vedenlaadun 3D-laskenta .....	99
3.4.1	Virtauslaskennan varmistus .....	99
3.4.2	Veden laadun laskennan varmistus .....	104
3.4.3	Päällysveden pumppauksen vaikutus .....	109
<b>4</b>	<b>Tulosten tarkastelu .....</b>	<b>114</b>
4.1	Pohjanpitäjänlahden veden vaihdunta .....	114
4.1.1	Vaihdunnan ja kerrostumisen vuorovaikutus .....	114
4.1.2	Vaihdunnan suuruus Tammisaaren salmissa .....	114
4.1.3	Tammisaaren ja Vitsandin salmien vaihduntaa säätelevät tekijät .....	115
4.1.4	Valuma-aluevirtaaman vaikutus suolaisen meriveden sisäänvirtaukseen ja alusveden uusiutumiseen .....	118
4.2	Suolan ja hapen pitoisuudet ja taseet .....	120
4.2.1	Pitoisuusvaihteluihin vaikuttavat hydrologiset tekijät .....	119
4.2.2	Hapetuspumppauksen vaikutus alusveden taseisiin .....	124
4.2.3	Hapetuspumppauksen vaikutus alusveden pitoisuuksiin .....	124
4.2.4	Kuormituksen vaikutus happipitoisuuteen .....	126
4.3	Alusvedessä happea kuluttavan orgaanisen aineksen tase .....	129
4.3.1	Valuma-alueelta tulevan ja perustuotannosta peräisin olevan hiukkasmaisen orgaanisen aineen kuormitus .....	129
4.3.2	Meriveden sisäänvirtauksen mukana tuleva happea- kuluttava kuormitus .....	132
4.4	Hapetuspumppauksen vaikutus ravinteiden liikkumiseen .....	133
4.5	Laskentamenetelmien vertailu .....	136
4.5.1	Regressio-, tase- ja 3D-mallit .....	136
4.5.2	Hapenkulutuksen laskentamenetelmät .....	136
4.6	Epävarmuustekijät .....	137
4.6.1	Havaintoaineisto ja tasetarkastelu .....	137
4.6.2	3D-laskenta .....	138
<b>5</b>	<b>Tulosten hyödyntäminen ja jatkotoimet .....</b>	<b>139</b>
	<b>Yhteenveto .....</b>	<b>141</b>
	<b>Sammandrag .....</b>	<b>144</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>146</b>
	<b>Kirjallisuus .....</b>	<b>148</b>
	<b>Liitteet</b>	
1	Suunnitelmia ja selvityksiä sekä suojeluhankkeita Pohjanpitäjänlahden alueella .....	151
2	Kolmiulotteisen mallin laskentaperusteet .....	152
3	Kuvat .....	155
4	Taulukot .....	159
	<b>Kuvailulehdet .....</b>	<b>161</b>

# Johdanto

## 1.1 Alueen yleiskuvaus

Pohjanpitäjänlahti on makean veden ja murtoveden vaihtumisvyöhykkeenä poikkeuksellinen sekä hydrografialtaan että biologialtaan. Sitä voi verrata ominaisuuksiltaan vuonoon. Lahti on noin 15 km pitkä ja suhteellisen syvä (runsas 40 m) merenlahti, joka Tammisaaren saariston kautta on yhteydessä Suomenlahteen. Tammisaaren kohdalla ja siitä etelään on matala kynnyسالue, jonka suurin syvyys laivaväylän kohdalla on 6–7 m. Tämä matala kynnyس rajoittaa virtauksia Tammisaaren ulkopuoliselta saaristoalueelta Pohjanpitäjänlahteen.

Pohjanpitäjänlahden vesi on pysyvästi kerrostunut. Jokien tuoma makea vesi muodostaa vähäsuolaisen pintavesikerroksen, jonka alla vesi on suolaisempaa ja tiheämpää. Vesimassoja erottaa harppauskerros, joka vuodenajasta riippuen on 2–15 m syvyydessä. Kovimmatkaan tuulet eivät pysty sekoittamaan vettä harppauskerrosta syvemmälle.

Alusveden vaihtuminen tapahtuu yleensä myöhäissyksyllä ja talvella. Esimerkiksi kesällä Pohjanpitäjänlahteen virtaa kyllä vähäsuolaista ja lämmintä pintavettä, mutta se ei sekoitu lahden raskaampaan alusveteen. Myöhään syksyllä ja talvella sisään virtaava vesi on yleensä tarpeeksi raskasta syrjäyttääkseen Pohjanpitäjänlahden vanhan alusveden. Oikullinen veden vaihdunta tekee Pohjanpitäjänlahdesta kuormitukselle hyvin herkän.

Pohjanpitäjänlahden alusveden happitilanteen on todettu olevan ajoittain varsin huono. Happitilanne oli melko heikko 1970-luvulla, mutta sen jälkeen tilanne parani vähitellen. Tämä tulkittiin yleisesti siten, että myönteinen kehitys oli seurausta alueen taajamien jätevesien puhdistamisen aloittamisesta. Myönteinen kehitys kääntyi kuitenkin melko nopeaan laskuun 1980-luvun lopussa, ja marraskuun alussa vuonna 1990 happi oli käytännöllisesti katsoen lopussa ( $0,1 \text{ mg l}^{-1}$ ) pohjan lähellä.

Huolestuttavaa on, että lahden happiongelmat eivät koske pelkästään pohjan lähellä olevia vesimassoja, kuten monesti on tilanne happiongelmistä kärsivissä vesistöissä. Pohjanpitäjänlahdessa happitilanne heikkenee voimakkaasti heti harppauskerroksen alapuolella. Siten happiongelmistä kärsivän veden määrä on huomattavan suuri. Tämä heijastuu Pohjanpitäjänlahden eläimistöön. Esimerkiksi 10 m:n alapuolella pohjaeläimistö on selvästi köyhtynyt, ja eliöitä esiintyy vain satunnaisesti (Mettinen 1998). Syvänteiden heikko happitilanne ja pohjaeläimistön häiriintyminen huonontavat myös kalojen elinmahdollisuuksia ja ravinnonsaantia. Monet kalalajit, kuten siika, hakeutuvat kesällä syvemmälle, missä vesi on kylmää. Rantavyöhykkeen lämpimien vesien kalasto on sitä vastoin Pohjanpitäjänlahdella runsas (Holmberg 1997).

Pistemäistä ravinteiden ja orgaanisen aineen kuormitusta Pohjanpitäjänlahdelle tulee Karjaan ja Pohjan taajamista, mutta myös Lohjanjärven eteläosan yhdyskuntien ja teollisuuden jätevesipäästöt ulottuvat Mustionjoen kautta Pohjanpitäjänlahdelle. Ajoittain meriveden virratessa sisään Pohjanpitäjänlahteen myös Tammisaaren jätevesipäästöt ulottuvat lahden eteläosaan. Pistekuormituksen osuus lahteen kohdistuvasta kokonaisravinnekuormituksesta on nykyään kuitenkin varsin pieni jätevesien puhdistustekniikan kehittymisestä sekä Mustion-

joen alajuoksun varrella olevan teollisuustoiminnan vähenemisestä johtuen (Holmberg ym. 1999). Hajakuormitus on tänä päivänä suurin ravinnekuormituslähde. Peltoviljelyn osuus kuormituksesta on suurin, mutta myös haja-asutus ja metsätalous kuormittavat vesistöä.

## **1.2 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet**

Pohjanpitäjänlahden alue on arvokas erityisesti tutkimusalueena, se on mukana monissa suojeleohjelmissa tai ohjelmaehdotuksissa ja lahden suojelua on käsitelty useissa suunnitelmissa ja selvityksissä. Näistä on esitetty luettelo liitteenä 1. Pohjanpitäjänlahdella on tehty paljon tutkimustyötä Helsingin Yliopiston Tvärminnen eläintieteellisen aseman toimesta. Viimeisin laaja perusselvitys on tehty vuosina 1990–92 (Kristoffersson ym. 1994).

Huolestuttava kehitys lahden tilassa käynnisti 1990-luvun alussa laajan Pohjanpitäjänlahden pelastamiseen tähtäävän toiminnan. Vuodesta 1991 alkaen on toiminut alueellinen Pelastakaa Pohjanpitäjänlahti -työryhmä, joka toimii edelleen alueellisena seurantaryhmänä. Ryhmässä ovat edustettuina alueen kunnat (Karjaa, Pohja ja Tammisaari), Uudenmaan liitto, Uudenmaan ympäristökeskus, Helsingin yliopiston Tvärminnen eläintieteellinen asema, Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry, Insinööritoimisto Maa ja Vesi Oy ja maanomistajat sekä maataloustuottajat.

Ryhmä on käynnistänyt alueella lukuisia hankkeita, joiden tavoitteena on ollut suojelun edistäminen Pohjanpitäjänlahden alueella. Ryhmän toimesta laadittiin vuonna 1991 alustava Pohjanpitäjänlahden happikadon torjuntasuunnitelma. Suunnitelman toimeenpanoon tarjoutui mahdollisuus vuonna 1995. Alusveden hapettamista kokeiltiin kolmella Mixox-tyyppisellä laitteella, jotka pumppaavat hapekasta päällysvettä hapenpuutteesta kärsivään alusveteen. Syynä ilmastuksen aloittamiseen loppukesällä 1995 oli lahden poikkeuksellisen heikko happitilanne jo vuoden 1995 keväällä ja syksyllä 1995 uhannut happikato. Kyseessä oli tällöin akuutin happikadon torjunta. Syksyllä 1996 jatkettu ilmastus oli etukäteen suunniteltua koetoimintaa.

Hapetuskokeilun rinnalla käynnistettiin Pohjanpitäjänlahdella tutkimushanke. Kyseessä oli ensimmäinen kerta, kun hapetuspumppausta on käytetty Suomen rannikkoalueilla. Sen sijaan oli olemassa laaja käyttökokemus sisävesien happiongelmien hoidosta. Pohjanpitäjänlahden päällys- ja alusveden välillä vallitsevan suuren tiheyseron pelättiin haittaavan pumppausta. Pumppujen vaikutuksia seurattiin tiiviisti vedenlaatu- ja virtausmittauksin. Tavoitteena oli selvittää Pohjanpitäjänlahden happitilanteeseen vaikuttavia tekijöitä sekä erityisesti hapetuspumppauksen vaikutuksia. Virtaus- ja vesistöseuranta-aineiston käsittelyssä pyrittiin tilastollisten riippuvuuksien selvittämiseen, taseiden laskentaan sekä virtausten ja vedenlaadun deterministiseen mallintamiseen. Näiden avulla pyrittiin määrittämään alusveden vaihduntaan vaikuttavat tekijät sekä alusveden vesi-, suola- ja happitaseet. Erityisesti haluttiin määrittää hapetuspumppauksen, meriveden sisäänvirtauksen ja vertikaalisen sekoittumisen vaikutusosuudet Pohjanpitäjänlahden alusveden suola- ja happipitoisuuteen vuosina 1995–1996. Pohjanpitäjänlahden alusveden syksyisen happivajeen ennakoiminen on vaikeaa. Jotta pumppauspäätökseen ja sen toimeenpanoon jäisi riittävästi aikaa, pyrittiin löytämään keinoja syksyisen happitilan ennakoimiseen jo kesällä tai jopa keväällä.

Hapetuskoetta suunniteltaessa pidettiin mahdollisena, että pumppauksesta aiheutuisi alhaalta ylöspäin pystyvirtaus, joka voisi siirtää ravinteita alemmasta vesikerroksesta päällysveteen aiheuttaen levätuotannon voimistumista. Tämän vuoksi tutkittiin myös vaikuttaako hapetus sedimentistä vapautuvien ravinteiden siirtymiseen.

## Aineisto ja menetelmät

### 2.1 Tutkimusalue ja sääolosuhteet

#### 2.1.1 Morfologia

Pohjanpitäjänlahden valuma-alue lahti mukaan lukien on kooltaan noin 2 350 km<sup>2</sup>. Suurin osa valuma-alueesta on Karjaanjoen vesistöaluetta (2 045 km<sup>2</sup>), joka laskee Mustionjoen kautta Pohjanpitäjänlahteen. Lähivaluma-alueen vesistöistä suurin on Fiskarsinjoen vesistöalue. Taulukossa 1 on esitetty Pohjanpitäjänlahteen laskevat vesistöt sekä niiden pinta-alat.

Taulukko 1. Pohjanpitäjänlahteen laskevat vesistöt (ympäristöhallinnon vesistöaluekisteri).

Valuma-alue		Pinta-ala km <sup>2</sup>
23	Karjaanjoen vesistöalue	2 045
82.002	Fiskarsinjoki	131
82.004	Dalkarbybäcken	31
82.006	Kullaanjärvi	53
81.077	Starrbölebäcken	15
82v007	Välialue	26
82v005	"	1,2
82v003	"	3,3
82v001	"	1,0
81v078	"	3,8
81v076 <sup>1)</sup>	"	40

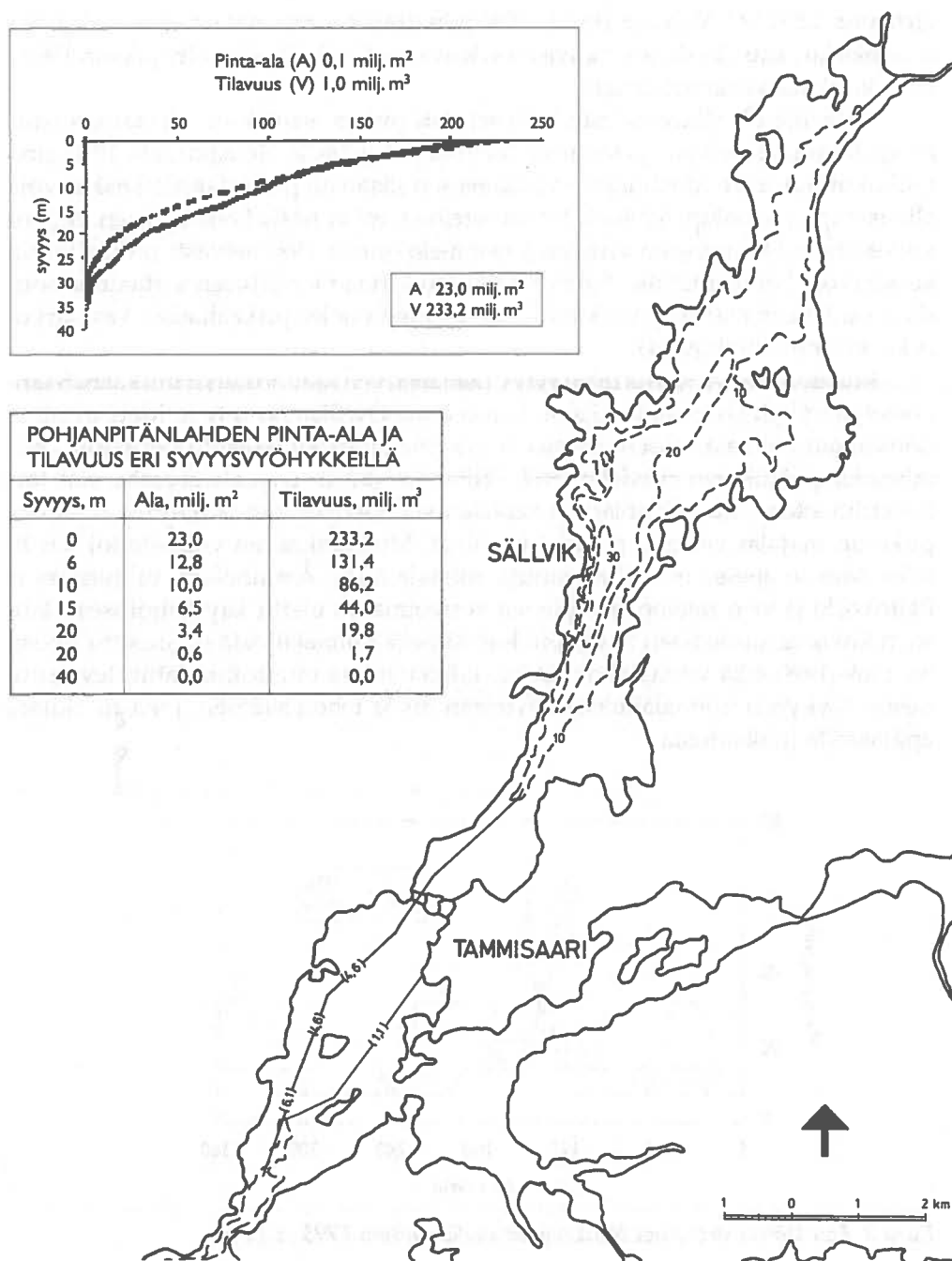
<sup>1)</sup> Noin puolet laskee Dragsviksfjärdeniin.

Lahden pinta-ala on 22,5 km<sup>2</sup>, suurin syvyys 42 m, keskisyvyys 9,3 m ja tilavuus noin 210 × 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>. Lahden suurin pituus on noin 14,5 km, suurin leveys noin 4,5 km ja keskileveys noin 1,6 km (Seuna 1971). Kynnys ulkomerelle Tammisaaren kohdalla väylällä on noin 6–7 m, muuten kynnysalue on 2–3 m syvää. Tammisaaren edusta Stadsfjärden on matalaa aluetta. Vesialue syvenee Källvikenin kohdalla noin 16 metriin mutta mataloituu noin kuuteen metriin Vitsandissa. Lahdialue jatkuu tästä etelään päin kapeina ja sokkeloisina salmina syventyen vähitellen merelle päin siirryttäessä. Tvärminne Storfjärden on syvyydeltään noin 35 metriä, josta merialue edelleen syvenee kynnyksettömästi kohti Ajaxin 81 metrin syvännettä. Tutkimusalue on esitetty kuvassa 1 ja Pohjanpitäjänlahden tilavuus- ja pinta-alasuhteet kuvassa 2.



Kuva 1. Tutkimusaluekartta.





Kuva 2. Tutkimusalueen syvyyskäyrät ja Pohjanpitäjänlahden tilavuus-pinta-alakäyrä (pinta-alakäyrä ehyt viiva, tilavuuskäyrä katkoviiva).

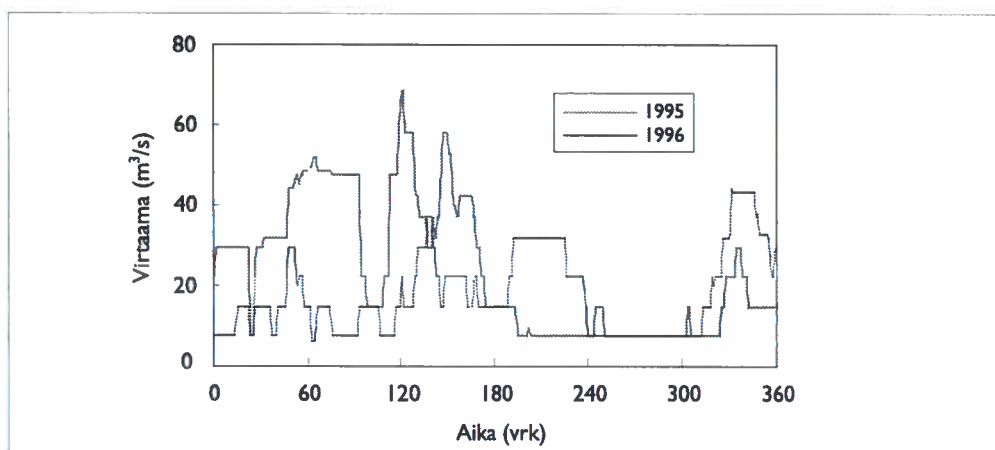
## 2.1.2 Hydrologia

Karjaanjoen virtaamaa mitataan Peltokoskella, Mustionjoen yläjuoksulla. Peltokosken yläpuolinen Karjaanjoen valuma-alue on kooltaan 1 935 km<sup>2</sup> ja alapuolinen valuma-alue 110 km<sup>2</sup>. Virtaama Mustionjoen suulla on laskettu kertomalla Peltokosken virtaama koko valuma-alueen ja Peltokosken yläpuolisen valuma-alueen suhteella 1,057. Näin laskettu keskivirtaama Mustionjoen suulla on vuonna 1995 ollut 24 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> ja vuonna 1996 18 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Vuosijaksolla 1980–1996 keskivirtaama Mustionjoen suulla on ollut 20,7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, keskiylivirtaama 55 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> ja keskiali-

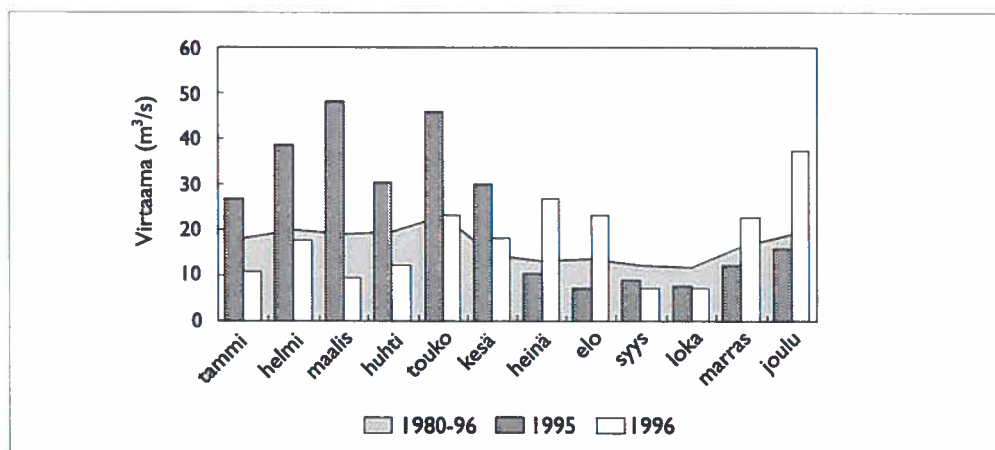
virtaama  $4,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Vuosien 1995 ja 1996 päivittäiset virtaamat on esitetty kuvassa 3 sekä kuukausikeskiarvot kuvassa 4. Kuvassa 4 on lisäksi esitetty jakson 1980–1996 kuukausikeskivirtaamat.

Virtaama oli alkuvuodesta 1995 selvästi pitkän ajanjakson virtaamaa suurempi johtuen sateisesta ja leudosta talvesta ja kevästä. Heinäkuusta 1995 aina toukokuuhun 1996 Mustionjoen virtaama sen sijaan oli pitkäaikaisia keskiarvoja alhaisempi. Heinäkuu 1996 oli hyvin sateinen, mikä nosti Lohjanjärven vedenkorkeutta ja Mustionjoen virtaamia heinä-elokuussa 1996 selvästi pitkäaikaisia keskiarvoja korkeammalle. Syksyn alhaisten virtaamien jälkeen virtaamat nousivat uudelleen marras-joulukuun 1996 sateiden vuoksi pitkäaikaisia keskiarvoja korkeammalle (kuva 4).

Mustionjoen virtaama määräytyy Lohjanjärven säännöstelyn mukaan. Säännöstelyn nykyinen luvanhaltija on Länsivoima Oy. Säännöstely hoidetaan Mustionkosken voimalaitoksen padolla ja nykyinen juoksutussääntö perustuu vesioikeuden päätökseen vuodelta 1989. Tällöin Lohjanjärven juoksutussääntöjä tarkistettiin siten, että Lohjanjärven kesäajan vedenkorkeudet tasaantuivat ja loppukesän matalat vedenkorkeudet nousivat. Mustionkosken voimalaitoksen lisäksi Mustionjoessa on kolme muuta voimalaitosta: Äminnefors, Billnäsfors ja Peltokoski ja joen rakennuskelpoinen vesivoima on otettu käytännöllisesti katsoen kokonaisuudessaan käyttöön. Kaikki neljä voimalaitosta on uusittu vuosina 1989–1990 eikä voimalaitoksiin ole odotettavissa muutoksia lähitulevaisuudessa. Nykyisin voimalaitoksia käytetään myös tehon säätöön, joka merkitsee epätasaista juoksutusta.



Kuva 3. Päivittäiset virtaamat Mustionjoen suulla vuosina 1995 ja 1996.



Kuva 4. Virtaamien kuukausikeskiarvoja Mustionjoen suulla vuosina 1995 ja 1996 sekä jaksolla 1980–1996.

### 2.1.3 Sääolot

Sääoloja koskevat tiedot on koottu vuosien 1995 ja 1996 Pohjanpitäjänlahtea koskevista velvoitetarkkailuraporteista (Holmberg ja Jokinen 1996, 1997). Sademäärä- ja lämpötilatiedot ovat Hangon edustalla sijaitsevalta Russarön säähavaintoasemalta.

Talvella 1994–95 ja keväällä 1995 sademäärät olivat normaalia suuremmat. Talvi oli hyvin leuto ja sateet tulivat enimmäkseen vetenä tai räntänä. Pysyvän lumipeitteen kausi oli hyvin lyhyt ja jäätalvi oli hyvin lievä. Keskitalvella Pohjanpitäjänlahti oli jäässä, mutta salmet ja saaristo Tammisaaresta ulospäin pysyivät sulana lähes koko talven. Sademäärät ylittivät selvästi pitkäaikaiset keskiarvot aina heinäkuuhun asti. Heinäkuussa sää muuttui kuivaksi ja jatkui vähäsateisena aina syyskuun puoliväliin asti. Myös myöhemmin syksyllä sää jatkui melko vähäsateisena vuoden loppuun asti. Keväällä ja kesällä lämpötila vastasi suunnilleen pitkäaikaisia keskiarvoja. Syksyllä sää pysyi keskimääräistä lämpimämpänä joulukuuhun saakka. Joulukuussa sää muuttui selvästi talvisemmaksi.

Vuoden 1996 talvi oli kylmä ja pitkä. Se oli selvästi ankarin kymmeneen vuoteen. Jääpeitteinen kausi alkoi jo joulukuusta 1995 ja jatkui aina toukokuun 1996 alkuun asti. Talvi oli myös runsasluminen. Koea ja sateinen sää jatkui lähes koko kevään aina heinäkuun puoliväliin asti. Tämän jälkeen sää lämpeni nopeasti ja jatkui normaalia lämpimämpänä joulukuuhun saakka. Heinäkuu 1996 oli ennätyksellisen sateinen, jonka jälkeen taas seurasi hyvin kuiva alkusyksy. Marras- ja joulukuussa sademäärät kasvoivat jälleen pitkäaikaisia arvoja korkeammiksi.

Kokonaissäteily (Helsinki-Vantaa) oli keväällä 1995 ja alkukesällä hieman normaalia alhaisempaa, mutta loppukesällä ja syksyllä taas hieman korkeampaa. Vuoden 1996 keväällä ja alkukesällä kokonaissäteily oli hieman pitkäaikaisesta keskiarvoa alhaisempaa, mutta loppukesällä taas korkeampaa. Merivesi oli kesällä 1995 keskimäärin hieman lämpimämpää kuin kesällä 1996. Etenkin elokuussa 1995 vesi oli hyvin lämmintä.

## 2.2 Kuormitus

### 2.2.1 Mustionjoki

Mustionjoen on arvioitu tuovan noin 87 % Pohjanpitäjänlahteen kohdistuvasta fosforikuormituksesta sekä noin 84 % typpeikuormituksesta (Räike ym. 1998). Kuormitus on peräisin valuma-alueen maataloudesta, muusta hajakuormituksesta sekä pistekuormituksesta.

Mustionjoesta Pohjanpitäjänlahdelle vuosina 1995 ja 1996 kulkeutuneen orgaanisen hiilen ja ravinteiden vuosikeskiarvot on esitetty taulukossa 2. Vedenlaatu-tietoina kuormituslaskelmissa on käytetty pitoisuushavaintoja Pinjaisissa sijaitsevalta havaintoasemalta Mustionjoki 4,9, joka sijaitsee 4,9 km ylöspäin jokisuusta. Virtaamat on laskettu Mustionjoen suulle.

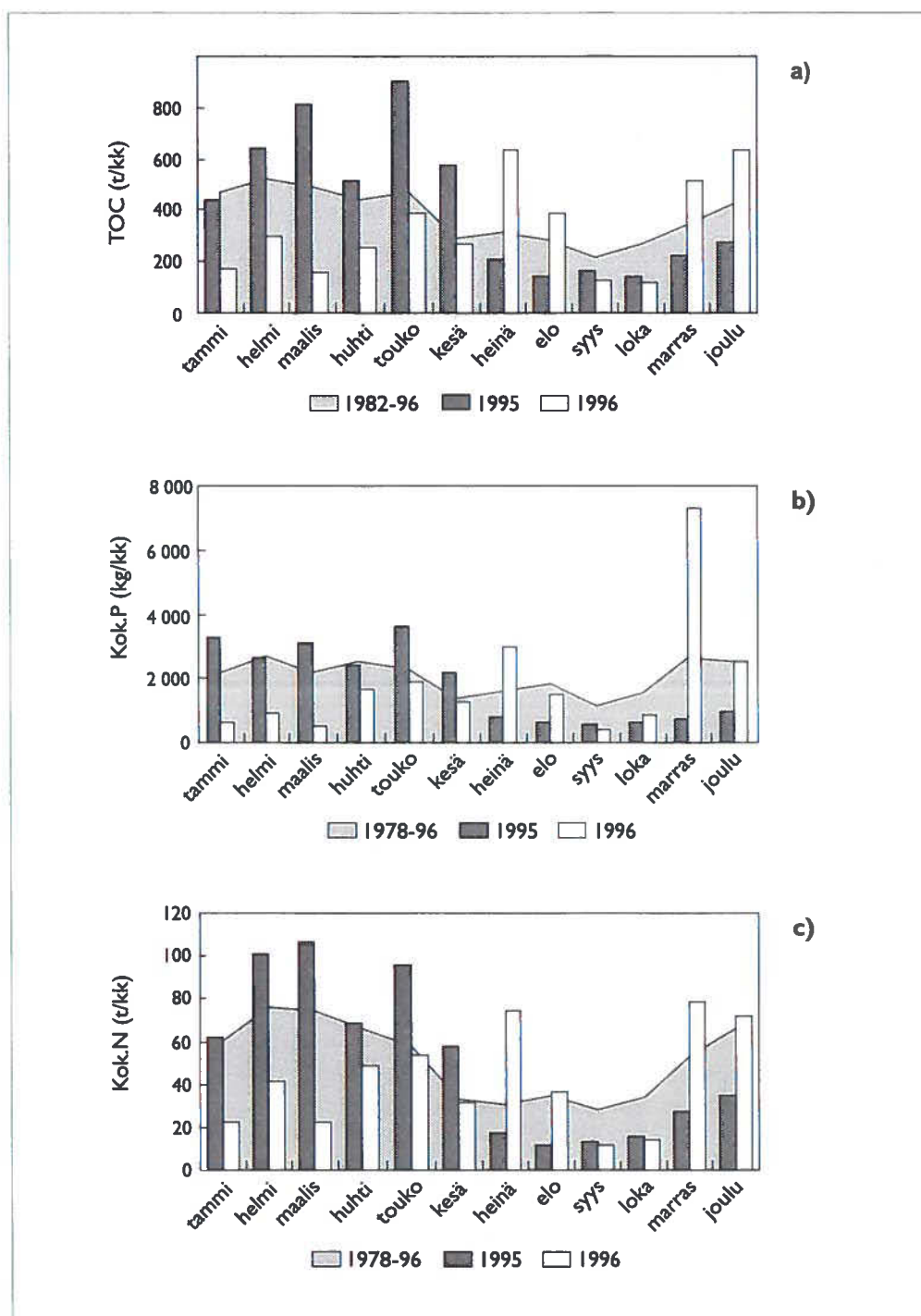
Taulukko 2. Mustionjoen Pohjanpitäjänlahdelle kuljettamat ainemäärät vuosina 1995 ja 1996.

	1995	1996
Orgaaninen hiili (TOC) t kk <sup>-1</sup>	420	330
Kok. fosfori kg kk <sup>-1</sup>	1 810	1 880
Kok. typpi t kk <sup>-1</sup>	51	42
Keskivirtaama m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	24	18

Keskivirtaamaltaan selvästi suurempana vuotena 1995 sekä orgaanisen hiilen että typen määrät olivat selvästi vuotta 1996 korkeammat. Sen sijaan Pohjanpitäjänlahdelle kulkeutui fosforia hieman vähemmän vuonna 1995 kuin vuonna 1996.

Kuukausittaiset ainevirtaamat on esitetty kuvissa 5 a–c. Kuvissa on vertailun vuoksi esitetty myös pidemmän ajanjakson kuukausiarvoja.

Alkuvuosi 1995 oli sateinen ja se lisäsi erityisesti orgaanisen aineen ja typen huuhtoutumista valuma-alueelta. Myös fosforin huuhtoutuminen oli selvästi suurempaa alkuvuodesta 1995 kuin alkuvuodesta 1996. Vuoden 1996 suuret fosforimäärät Mustionjoessa aiheutuivat erityisesti poikkeuksellisen suurista huuh-



Kuva 5 a–c. Mustionjoen ainevirtaamat Pohjanpitäjänlahdelle vuosina 1995 ja 1996 sekä aikajaksolla 1978–1996 (kok.P ja kok.N) ja 1983–1996 (TOC).

toutumista loppuvuodesta 1996. Varsinkin marraskuussa 1996 Mustionjoesta Pohjanpitäjänlahdelle kulkeutui erittäin runsaasti fosforia, mikä nosti koko vuoden keskiarvon korkealle. Myös typen ja orgaanisen hiilen määrät lisääntyivät tällöin, mutta eivät suhteessa yhtä paljon kuin fosforin. Heinä-elokuussa 1996 ravinteiden ja orgaanisen aineen huuhtoutumat olivat selvästi korkeammat kuin vastaavana ajankohtana vuonna 1995. Tämä johtui runsassateisesta heinäkuusta 1996, mikä nosti vesistöjen virtaamia kevään ylivirtaamien tasolle.

## 2.2.2 Jätevesikuormitus

Suora jätevesikuormitus Pohjanpitäjänlahdelle on vähäistä. Suurin osa lahdelle tulevasta jätevesikuormituksesta on peräisin Lohjanjärven ja Mustionjoen kuormittajilta. Lohjanjärveen tulevasta kuormituksesta on arvioitu pidättyvän järveen noin 30 % tyydestä ja noin 40 % fosforista (Räike, Pietiläinen ja Pitkänen 1998). Myös Tammisaaren jätevedet voivat ulkomereltä tulevan sisäänvirtauksen mukana levitä Pohjanpitäjänlahdelle. Jätevesikuormitus ja sen jakaantuminen vuosina 1995 ja 1996 on esitetty taulukossa 3 ja tärkeimmät Mustionjoen ja Pohjanpitäjänlahden kuormittajat kuvassa 1. Taulukossa esitetyn lisäksi pistemäistä kuormitusta lahdelle tulee IDO Kylpyhuone Oy:n tehtaalta, Österbyn kaatopaikalta sekä Golf-Marinan venesatamasta.

Ainoastaan Metsä-Serla Oy:n ja Lohjan Paperi Oy:n jätevesistä määritetään orgaanisen aineen pitoisuus myös COD<sub>Cr</sub>-arvona, joka BOD<sub>7</sub>-arvoa paremmin kuvaa tehtaiden jätevesien orgaanista kuormitusta. Metsä-Serlan jätevesikuormitus oli sekä vuonna 1995 että 1996 selvästi aikaisempaa pienempi. Esim. COD<sub>Cr</sub>-kuormitus vesistöön oli vain noin puolet vuosien 1990–1994 kuormituksesta. Vuoden 1997 alussa Kirkniemessä otettiin käyttöön uusi paperikone, jonka jälkeen COD<sub>Cr</sub>-kuormitus on tutkimusvuosiin verrattuna noussut noin kaksinkertaiseksi. Vuoden 1998 lopulla Metsä-Serlan kuormitus nousi poikkeuksellisen korkeaksi puhdistamohäiriöiden vuoksi, mikä nosti esim. vuoden 1998 COD<sub>Cr</sub>-vuosikuorman lähes kolminkertaiseksi tutkimusvuosiin 1995–96 verrattuna. Muiden kuormittajien osalta vuodet 1995 ja 1996 edustivat melko hyvin kuormittajien keskimääräisiä kuormitusarvoja 1990-luvulla.

Taulukko 3. Jätevesikuormitus vuosikeskiarvoina vuosina 1995 ja 1996 (ympäristöhallinnon VAHTI-tietojärjestelmä).

	1995						1996					
	Q m <sup>3</sup> /d	BOD <sub>7</sub> <sup>1)</sup> kg/d	COD <sub>Cr</sub> kg/d	k-aine kg/d	kok.P kg/d	kok.N kg/d	Q m <sup>3</sup> /d	BOD <sub>7</sub> <sup>1)</sup> kg/d	COD <sub>Cr</sub> kg/d	k-aine kg/d	kok.P kg/d	kok.N kg/d
1) Lohjanjärvi												
Lohjan Paperi Oy	11 500	280	930	267	0,3	45	12 200	290	1 070	295	0,4	45
Pitkäniemi Oy	8 160	36		57	2,4	192	8 230	41		75	2,9	224
Metsä-Serla Oy	9 410	64	1 410	238	2,9	27	12 200	102	1 610	463	3,8	54
Lohja, Peltoniemi jvp	2 880	13		36	0,6	56	2 650	8,9		39	0,4	69
2) Mustionjoki												
Karjaa, Mustio jvp	150	1,8		2	0,1	5,5	140	3		5	0,1	5,1
Karjaa, Karjaa-Pinjainen jvp	6 000	63		85	1,8	110	6 450	65,8		157	3,7	105
3) Pohjanpitäjänlahti												
Pohja, Gumnäs jvp	1 370	7,9		6	0,3	42	1 390	10,8		11	0,4	40
4) Tammisaaren merialue												
Tammisaari, Skeppsholmen jvp	3 640	23		65	1,1	68	3 320	15,7		53	1,1	46
Tammisaari, Rögrund jvp	880	3,8		9	0,2	21	920	3		10	0,3	23

<sup>1)</sup> BOD<sub>7,410</sub> lukuunottamatta Lohjan Paperi 1995 ja Metsä-Serla 1995–1996



## 2.3 Hapetuspumppujen toiminta

Mixox-hapetuksen periaatteena on johtaa hapellista päällysvettä pohjan lähelle alusveteen, jolloin tiheyserot aiheuttavat tarvittavan horisontaali- ja vertikaalisekoittumisen alusvedessä. Pääosa johdetusta kevyestä päällysvedestä ja sen mukana viedystä hapestaa jää raskaaseen, melko homogeeniseen alusveteen, jonka tilavuutta hapettimet kasvattavat aiheuttamiensa virtaamien mukaisesti. Johdettu vesi ei siis palaudu lähtötasolleen melko homogeeniseen päällysveteen, ja käytännössä pääosa vaikutuksesta jää tiheyden vaihtumisvyöhykkeen eli väliveden alapuolelle. Hapetinlaite on suurikokoinen, mutta hidaskierroksinen potkuripumppu, joka pumppaa päällysvettä trevirakangassukkaa myöten alusveteen.

Sällvikin pääsyvänteen alusvettä hapetettiin Vesi-Eko Oy:n urakoimana kolmella Mixox-1100-hapetinlaitteella. Laitteet olivat käynnissä ajan 29.9.–11.12.1995 ja vuotta myöhemmin ajan 28.8. – n. 20.12.1996 (laitteet no. 1 ja 3 käynnistyivät vuonna 1996 kuitenkin täydellä tehollaan vasta 10.9.1996 alkaen). Hapetinlaitteiden sijaintipaikka on esitetty kuvassa 6.

Käytettyjen kolmen hapetinlaitteen yhteinen vedenjohtoteho oli noin  $2,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ja hapensiirtoteho noin  $2100 \text{ kg O}_2 \text{ vrk}^{-1}$ . Vedenjohtosukkien pituus oli 21–26 m. Pumpun imuaukko oli noin 4 m syvyydessä ja purkuaukko noin 10 m pohjan yläpuolella. Hapettimet vaikuttivat pääosin 15–40 m väliseen tilavuuteen.

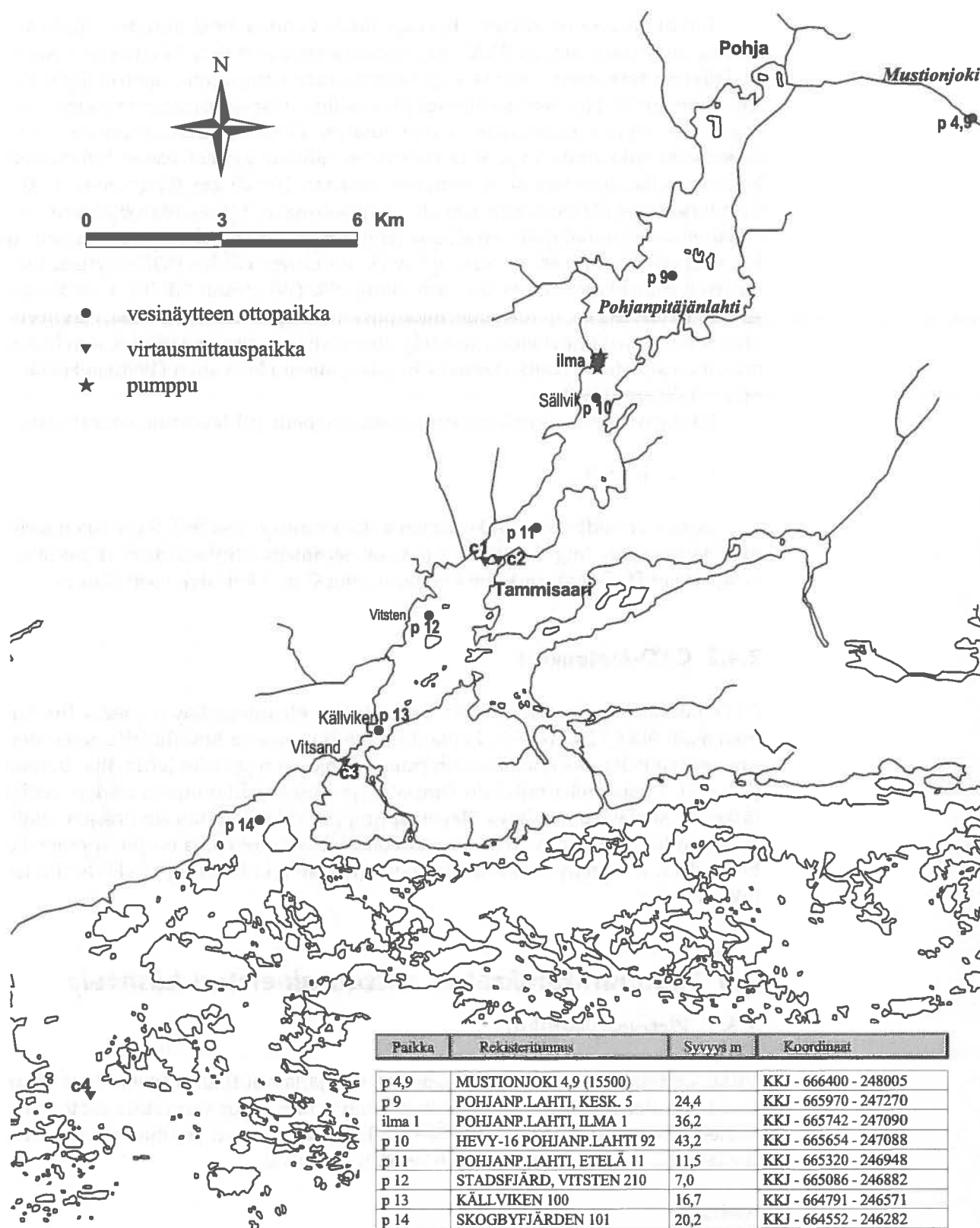
Kokeita häiritsi uusien olojen (suolaisuus ja aiempaa suuremmat putket) myötä ilmennyt sukkien painotusongelma. Sukkia jouduttiin lisäpainottamaan vielä syksyllä 1996. Syksy 1996 oli kokeiden kannalta sikäli edellisyysä edullisempi, että voimakas suolavesipulssi havaittiin vasta 15.–25.10.1996.

## 2.4 Näytteet ja CTD-luotaukset

### 2.4.1 Vesi- ja sedimentaationäytteet

Vesinäytteitä otettiin Mustionjoesta sekä useasta paikasta lahden pituussuuntaiselta keskilinjalta ja ulompaa Pohjanpitäjänlahdelle johtavalta salmialueelta. Näytteenotosta ja näytteiden analysoinnista vastasivat vuonna 1995 Helsingin yliopiston Tvärminnen eläintieteellinen asema (näytteenotto, CTD-sonditutkimukset ja ravinneanalyysit) sekä Länsi-Uudenmaan vesi- ja ympäristö ry (happi-, mangaani- ja klorofyllimääritykset). Vuoden 1996 näytteenoton ja analysoinnin suoritti pääosin Uudenmaan ympäristökeskus ja sondimittauksista vastasi Tvärminnen eläintieteellinen asema. Tarkastelussa on käytetty hyväksi myös Länsi-Uudenmaan vesi- ja ympäristö ry:n suorittamien velvoitetarkkailujen tuloksia sekä Metsä-Serla Oy:n erillistutkimusten tuloksia. Tämän tutkimuksen kannalta keskeisimmät määritykset olivat lämpötila, sähkönjohtavuus, suolaisuus ja happipitoisuus. Muut tehdyt määritykset olivat: näkösyvyys, sameus, pH, väriluku, kokonaisfosfori, fosfaattifosfori, kokonaistyppe, ammonium-, nitriitti- ja nitraattityppi, rauta, mangaani (osasta näytteitä), silikaatti, orgaaninen hiili (TOC) ja klorofylli a. Tässä raportissa viimeksi mainituista määrityksistä on käsitelty orgaanisen hiilen, ravinteiden ja klorofyllin tulokset.

Kaikkien havaintopaikkojen tuloksia ei ole käsitelty tässä raportissa. Esim. hapetinlaitteiden läheisyydestä otettiin näytteet kolmelta toisiaan lähellä olevalta havaintopaikalta. Tuloksia verrattiin keskenään ja niiden todettiin eroavan hyvin vähän toisistaan. Siksi raportissa on käytetty hapetinlaitteita lähinnä olevan havaintopaikan tuloksia (ilma 1). Havaintopaikat, niiden viralliset nimet, havaintopaikkojen syvyydet, koordinaatit ym. on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Hapetuslaitteiden sijainti, vesinäytteiden havaintopaikat ja virtausmittauspaikat.

Tutkimuksessa on käytetty hyväksi myös vuonna 1992 mitattuja hiukkas-maisen orgaanisen aineen (POC) pitoisuuksia vesinäytteistä Mustionjoen suul-la, Sälvikin syvänteellä (asema V) ja Tammisaaren siltojen alla sijaitsevilta näyt-teenottopisteiltä. Näytteet otettiin sekä halokliinin yläpuolisesta pintakerroksesta että sen alapuolelta. Samanaikaisesti mitattiin POC-sedimentaatiota keräimil-lä, jotka oli ankkuroitu 15 ja 30 m syvyyteen Sälvikin syvänteeseen. Sylinterien korkeus-halkaisijasuhde oli suositusten mukaan 100:10 cm (Heiskanen 1992). Sylinterien pohjalle johdettiin formaliinia (pitoisuus n. 1,9 %) mikrobihajotuksen ehkäisemiseksi keräilyjaksojen aikana (Heiskanen 1992). Sylinterit tyhjennettiin keväisin viikoittain ja kesällä sekä syksyllä joka toinen viikko. POC-näytteet suo-datettiin esihehkutetuille lasikuitusuodattimille (Whatman GF/F). Kuivatettu-jen suodattimien POC-pitoisuudet mitattiin hiili-typin analyysointilaitteilla. Näytteen-otto, sedimentaationäytteiden käsittely, analyysit ja sedimentaatiotulosten laske-minen on selostettu yksityiskohtaisesti julkaisuissa Heiskanen (1998) ja Heiska-nen & Tallberg (1999).

Hiukkashiilen keskimääräinen vajoamisnopeus ( $v$ ) laskettiin seuraavasti:

$$v = h \times S/C,$$

jossa  $h$  on sedimentaatiokeräimen ankkurointisyvyys (m),  $S$  on hiilen sedi-mentaationopeus ( $\text{mg C m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ ) ja  $C$  on sedimentaatiokeräimen yläpuolisen vesipatsaan POC-pitoisuuksien keskiarvo ( $\text{mg C m}^{-2}$ ) keräilyjakson aikana.

## 2.4.2 CTD-luotaukset

CTD-luotauksista vastasi pääosin Tvärminnen eläintieteellinen asema (luotai-men malli SIS CTDplus 100). Luotauksia tehtiin samalta keskilinjalta, jolta otet-tiin vesinäytteitä, sekä hapetuspumpuista pohjoiseen ja itään johtavilta linjoilta (kuva 7). Luotaimella mitattiin lämpötila ja sähkönjohtavuus ja niiden avulla laskettiin suolaisuus ja tiheys. Hapetuspumppujen lähellä olevien linjojen tulok-sissa ei ollut suuriakaan eroja. Tämän vuoksi tässä raportissa on pumppujen lä-heltä yleensä käytetty luotauspaikkojen 5 (on sama kuin p10) ja 6 (Huluvik) tu-loksia.

## 2.5 Virtausmittaukset ja mittausaineiston käsittely

### 2.5.1 Virtausmittaukset

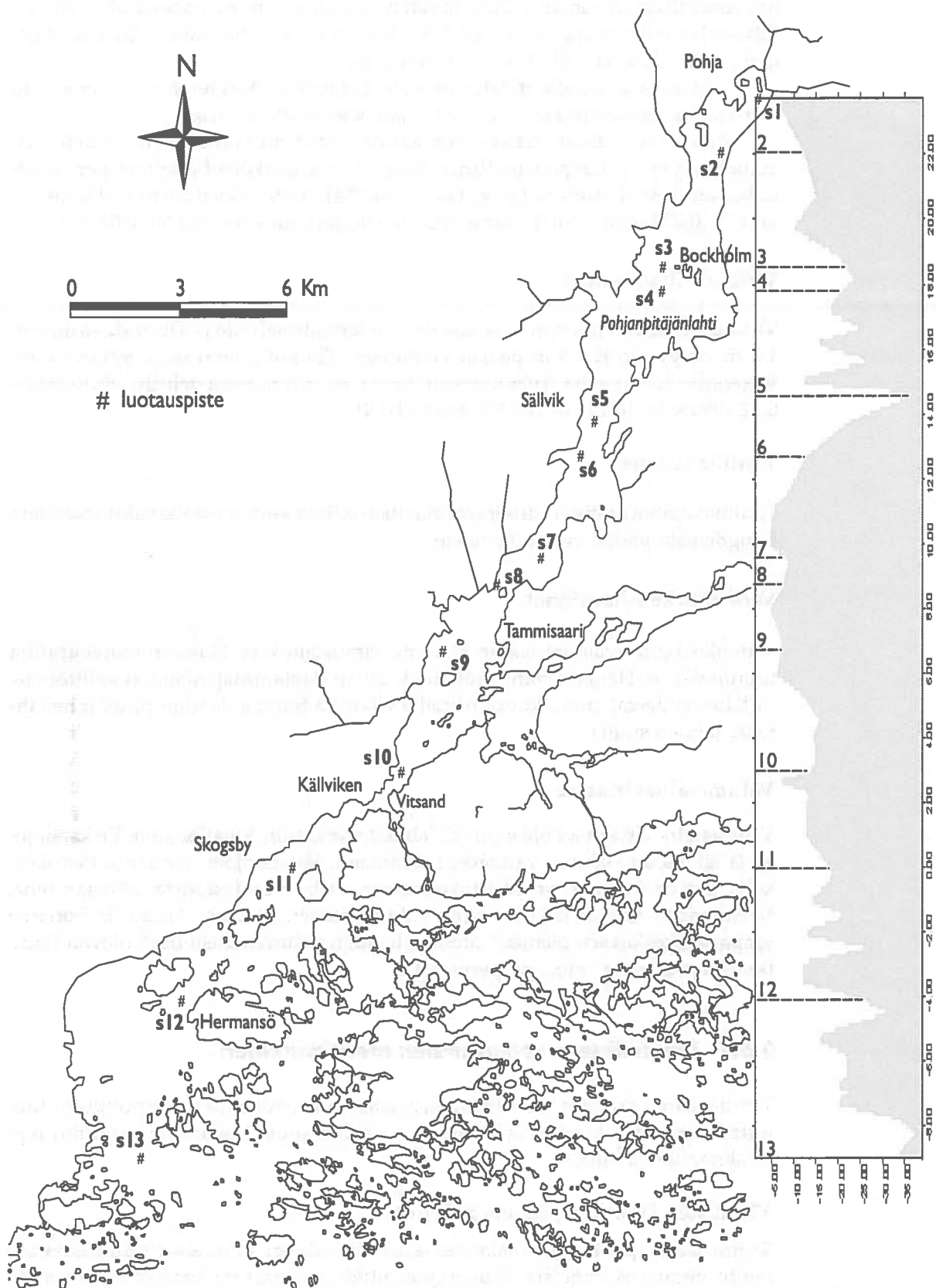
Virtausmittauksiin sisältyi sähkönjohtokyvyn ja lämpötilan mittaus. Mittaustu-losten käsittelyn yhteydessä koottiin ja analysoitiin myös virtauksia säätelevien tuulen, vedenkorkeuden ja tiheyden (laskettu lämpötilan ja johtokyvyn perus-teella) sekä valuma-aluevirtaaman seuranta-aineisto.

#### Mittarit

Virtauksia mitattiin pääasiassa ankkuroidulla mittarilla mallia Aanderaa RCM7/RCM4. Mittari rekisteröi virtauksen suunnan ja nopeuden sekä veden lämpöti-lan ja sähkönjohtokyvyn avovesikaudella 10 minuutin ja jääpeitteisenä aikana 30 minuutin välein. Hitain mitattavissa oleva virtausnopeus oli  $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ .

19.10.1995 mitattiin myös akustisella profiloivalla virtausmittarilla mallia RDI ADCP 1200 Tammisaaren ja Vitsandin salmissa virtausten vertikaalista ja





Kuva 7. CTD-luotauspaikat. Oikealla CTD-luotauspaikat ja merenpohjan syvyysprofiili (m). x-akselilla etäisyys (km) pisteestä s1.

horisontaalista jakaumaa. Hitain mitattavissa oleva virtausnopeus oli  $2 \text{ cm s}^{-1}$ . Pitkänajan mittaustarkkuus oli  $\pm 0,2 \% + 0,2 \text{ cm s}^{-1}$ , ja mittausalue  $\pm 20 \text{ m s}^{-1}$ . Mittausvertikaalissa voi olla 1–128 havaintosolua.

Aanderaa-kalustolla mitattu aineisto talletettiin Aanderaa-tietokantaan ja Current-katseluohjelmaan selailtaviksi jatkotarkasteluja varten.

Aanderaa virtausmittareissa on anturit, jotka mittaavat myös veden sähkönjohtokyvyn ja lämpötilan. Veden lämpötilan ja sähkönjohtokyvyn perusteella laskettiin suolaisuus ja tiheys (ks. kohta 2.4). Johtokykyanturin tarkkuus on  $\pm 0,1 \% (0,025 \text{ mmho cm}^{-1})$ . Lämpötila-anturin tarkkuus on  $\pm 0,1 \% (0,05 \text{ }^{\circ}\text{C})$ .

### **Virtausmittauspaikat**

Virtausmittarit asennettiin Tammisaaren molempiin salmiin ja Vitsandin salmeen 1,5 m syvyyteen ja 1,5 m pohjan yläpuolelle (Tammisaaren max. syvyys 6 m, Vitsandin 10 m) sekä Tvärminneen (kuva 6). Mittauksia tehtiin 25.10.1995–8.12.1996 sekä 16.10.–26.11.1997 (taulukko 4).

### **Tuulihavainnot**

Tuulihavainnot saatiin Tvärminnen eläintieteellisen aseman säähavaintoasemalta Längdenistä yhden minuutin välein.

### **Vedenkorkeushavainnot**

Vedenkorkeushavainnot saatiin Merentutkimuslaitoksen Hangon mareografilta tunnin välein. Hangon mareografi ei ole aivan Pohjanpitäjänlahden välittömässä läheisyydessä, mutta kuvaa pienellä viiveellä Suomenlahden pinnan heilahtelua lahden suulla.

### **Valuma-aluevirtaama**

Valuma-aluevirtaama Pohjanpitäjänlahdelle laskettiin Mustionjoen, Fiskarsinjoen ja lähivaluma-alueen valuntojen summana. Mustionjoen virtaama Peltokoskelta saatiin Suomen ympäristökeskuksen virtaamarekisteristä päiväarvoina. Mustionjoen alaosan ja koko muun valuma-alueen virtaama laskettiin Suomen ympäristökeskuksen pienten valuma-alueiden valuntarekisterissä olevan Siuntion Rudbäckenin valunnan perusteella.

## **2.5.2 Tilastollisten riippuvuuksien määrittäminen**

Tammisaaren salmissa mitattujen virtausten ja suolaisuuden riippuvuutta tuulesta, meriveden korkeusvaihteluista ja valuma-aluevirtaamasta tutkittiin regressiomallien avulla.

### **Virtausten ja tuulen pääkomponentit**

Tammisaaren ja Vitsandin salmissa laskettiin salmen suuntaiset virtauskomponentit virtausaikasarjoista. Pääkomponenttien suunnat molemmissa salmissa olivat 27 astetta. Tuuliaikasarjasta laskettiin vastaavasti tuulen pohjois- ja itäkomponenttien aikasarjat.

Taulukko 4. Virtausmittausjaksot ja -paikat 25.10.1995–8.12.1996 sekä 16.10. –26.11.1997.

Mittauspiste (syvyys/kokonaissyvyys)	Mittausjakso	Anturi
<b>Tammisaaren länsisalmi, C1</b>		
Pinta 1,5/6 m	(1) 24.10.95-2.1.96	V,S,T
	(2) 11.1.96-10.4.96	V,S,T
	(3) 10.4.96-16.6.96	V,S,T
	(4) 19.6.96-19.8.96	V,S,T
	(5) 19.8.96-8.10.96	V,S,T
	(6) 11.10.96-9.12.96	V,S,T
	(7) -	-
Pohja 4,5/6 m	(1) 24.10.95-2.1.96	V,S,T
	(2) 11.1.96-10.4.96	V,(S ei toimi),T
	(3) 10.4.96-18.6.96	V,S,T
	(4) 19.6.96-19.8.96	V,S,T
	(5) 19.8.96-8.10.96	V,S,T
	(6) 8.10.96-9.12.96	V,S,T
	(7) 16.10.-26.11.97	V,S,T
<b>Tammisaaren itäsalmi, C2</b>		
Pinta 1,5/6 m	(1) 15.11.95-10.4.96	V,T
	(2) -	-
	(3) 10.4.96-16.6.96	V,S,T
	(4) 20.6.96-7.8.96	S,T; nauha kelaunut pyörittäjään
	(5) -	mittarit Vitsandiin
	(6) -	-
	(7) -	-
Pohja 4,5/6 m	(1) -	-
	(2) -	-
	(3) 17.4.96-19.6.96	V,S,T
	(4) -	mittari kastui
	(5) -	mittarit Vitsandiin
	(6) -	-
	(7) -	-
<b>Vitsand, C3</b>		
Pinta 1,5/10 m	(1) -	-
	(2) -	-
	(3) -	-
	(4) -	-
	(5) 29.8.96-8.10.96	V,S,T
	(6) 11.10.96-18.11.96	V,S,T
	(7) -	-
Pohja 8,5/10 m	(1) -	-
	(2) -	-
	(3) -	-
	(4) -	-
	(5) 29.8.96-8.10.96	V,S,T
	(6) 11.10.96-18.11.96	V,S,T
	(7) 16.10.-26.11.97	V,S,T
<b>Tvärminne, C4</b>		
Pinta 5/20 m	(7) 16.10.-26.11.97	V,S,T
Pohja 15/20 m	(7) 16.10.-26.11.97	V,S,T

V = virtaus, S = johtokyky, T = lämpötila ja - = ei mittauksia.

## Keskiarvoistaminen ja askeltaminen kolmella tunnilla

Regressiotarkastelua varten virtauksen, suolaisuuden, tuulen ja valuma-aluevirtaaman aikasarjoille laskettiin kolmen tunnin keskiarvot. Vedenkorkeudelle laskettiin muutos kolmen tunnin askelilla.

Tuulen, vedenkorkeuden ja valuma-aluevirtaaman sarjoja viivytettiin 0, 3, 6, 9 ja 12 tuntia, jotta regressiotarkastelussa voitaisiin löytää niiden ja virtausten välinen viive.

## Keskiarvoistaminen ja askeltaminen viikolla

Virtaaman, suolaisuuden, tuulen, vedenkorkeuden ja valuma-aluevirtaaman aikasarjoille laskettiin myös viikon keskiarvot ja viivytys. Vastaavasti vedenkorkeudelle laskettiin muutos ja viivytys viikon askeleella.

## Havaintosarjojen jako kerrostumisen suhteen

Havaintosarjat jaettiin regressiotarkastelua varten kerrostumisen suhteen kolmeen jaksoon. Kerrostunut jakso oli 13.5.–30.8.1996, kerrostumattomat jaksot 24.10.–2.12.1995, 1.–12.5.1996 ja 1.9.–8.12.1996 ja jääpeitteinen jakso 3.12.1995–30.4.1996.

## Regressioanalyysi

Regressiomallien avulla tutkittiin virtausten ja suolaisuuden riippuvuutta selittävien muuttujien (tuuli, vedenkorkeus ja valuma-aluevirtaama) viivytetyistä aikasarjoista kerrostumisen suhteen kolmessa eri jaksossa. Jaksot olivat kerrostunut, kerrostumaton ja jääpeitteinen jakso. Regressiomallit virtaukselle ja suolaisuudelle muodostettiin SAS-ohjelmiston STEPWISE-proseduurilla, joka valitsee selittävät muuttujat merkitsevyyden mukaisessa järjestyksessä mukaan lineaariseen malliin ja estimoi niille regressiokertoimet.

### 2.5.3 Suolaisuuden ja tiheyden muunnoskaavat

#### Suolaisuuden laskeminen

Suolaisuus voidaan laskea vedestä mitatun sähkönjohtavuuden ja lämpötilan perusteella seuraavalla menetelmällä (UNESCO 1981, Bennet 1976, Dauphinee ja Klein 1977). Menetelmä soveltuu vedelle, jonka suolaisuus on 2–42 g kg<sup>-1</sup>. Lähellä makean veden pitoisuutta menetelmä yliarvioi suolaisuutta (Hill ja Dauphinee 1986). Virhe kasvaa lämpötilan funktiona. Tammisaaren ja Vitsandin salmien virtausmittauspaikoissa suolaisuus on kuitenkin yleensä niin suuri, ettei virhettä tästä syystä synny.

Mitattu in situ -johtavuus muutetaan ensin johtavuussuhteeksi:

$$R(S,T,P) = \frac{C(S,T,p)}{C(35\text{ g kg}^{-1}, 15^\circ\text{C}, 0)} \quad (1)$$

missä  $C(S,T,p)$  on johtavuus suolaisuudessa  $S$  (g kg<sup>-1</sup>), lämpötilassa  $T$  (°C) ja paineessa  $p$  (dbar).  $C(35\text{ g kg}^{-1}, 15^\circ\text{C}, 0) = 42,906\text{ mS cm}^{-1}$ .

Toiseksi, suoritetaan johtavuuden painekorjaus:

$$R(S,T) = \frac{R(S,T,p)}{(1+F)} \quad (2)$$

missä  $F$  on:

$$F = \frac{1.60836 \times 10^{-5} p - 5.4845 \times 10^{-10} p^2 + 6.166 \times 10^{-15} p^3}{1 + 3,0786 \times 10^{-2} T + 3,169 \times 10^{-4} T^2} \quad (2a)$$

Kolmanneksi korjataan lämpötilan vaikutus kaavalla:

$$R(S) = \frac{R(S, T)}{r_T} \quad (3)$$

missä  $r_T$  on määritelty:

$$r_T = 0,6765836 + 2,005294 \left(\frac{T}{100}\right) + 1,11099 \left(\frac{T}{100}\right)^2 - 0,726684 \left(\frac{T}{100}\right)^3 + 0,13587 \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (3a)$$

Lopuksi saadaan suolaisuus sijoittamalla  $R(S)$  kaavaan:

$$S = 0,08996 + 28,8567R + 12,18882R^2 - 10,61869R^3 + 5,98624R^4 - 1,32311R^5 + R(R-1)(0,0442T - 0,46 \times 10^{-3} T^2 + (1,25 \times 10^{-4} - 2,9 \times 10^{-6} T)p) \quad (4)$$

Konversion tuloksena saatava suolaisuus on yhtäpitävä kansainvälisistä oseanografisista taulukoista (UNESCO 1973) saatavien arvojen kanssa 15 °C lämpötilassa.

## Tiheyden laskenta

Meriveden tiheys laskettiin kaavalla (Van Rijn 1989):

$$\rho = 1000 + 1.455 \times Cl - 0.0065 \times (T - 4 + 0.4 \times Cl)^2 \quad (5)$$

$Cl$  = kloridipitoisuus ( $\text{g kg}^{-1}$ ,  $S = 0,03 + 1,805 \times Cl$ )

$T$  = lämpötila (°C)

$\rho$  = veden tiheys ( $\text{kg m}^{-3}$ )

## 2.5.4 Virtauksen nopeus- ja suuntajakauma

### Nopeusjakauma

Nopeusjakauma laskettiin 16:lle eri suunnalle painottamalla suuntajakauma virtausnopeudella. Nopeusjakauma ilmaisee veden pääasiallisen virtaus- ja kulkeutumissuunnan.

Tammisaaren länsiaukossa mitattujen virtausten nopeusjakautuma laskettiin mittausjaksoittain. Laskenta tehtiin Suomen ympäristökeskuksen ja Budapestin Teknillisen korkeakoulun kehittämällä Current-ohjelmalla.

## Spektri

Spektrianalyysin ideana on jakaa virtausaikasarja äärelliseen määrään harmonisia komponentteja (Jenkins ja Watts 1969). Fast Fourier Transform-algoritmeilla (Priestley 1981) aineisto jaetaan eriaallonpituisiin ja -taajuisiin sin- ja cos-aaltoihin kaavalla (6).

$$x(t) = a_0/2 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos w_k t + b_k \sin w_k t) \quad (6)$$

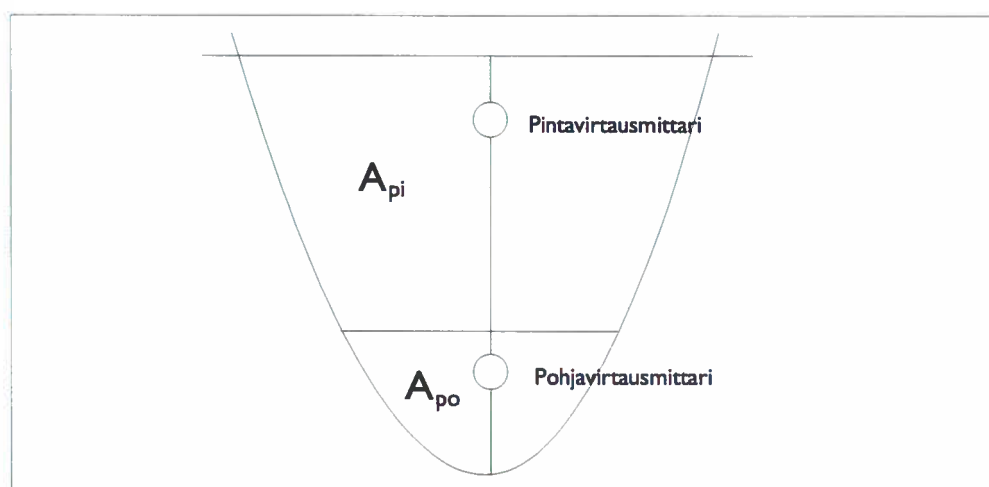
$x(t)$  = havaintosarja  
 $m$  =  $n/2$   
 $n$  = havaintojen lukumäärä  
 $a_k$  = Cos-kerroin  
 $b_k$  = Sin-kerroin  
 $w_k$  =  $2\pi k/n$

Spektrianalyysi tehtiin IMSL-ohjelmistokirjaston FFTREQ-algoritmeilla. Virtauksen spektristä voidaan nähdä millä taajuudella Pohjanpitäjänlahden suulla Tammisaaren ja Vitsandin salmissa edestakaisin virtaava vesi voimakkaimmin vaihtuu lahden ja meren välillä. Sen avulla voidaan päätellä fysikaalinen prosessi (esim. tuuli, Suomenlahden tai Pohjanpitäjänlahden seiches, tiheysvirtaukset, rannikkoalueen kumpuaminen), joka ohjaa veden vaihtoa.

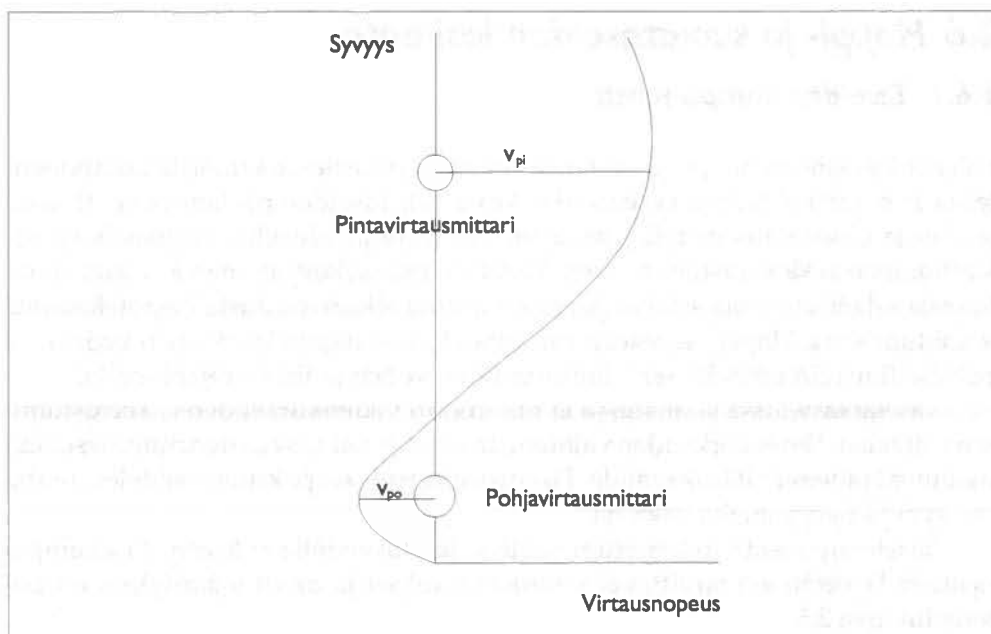
### 2.5.5 Vesitaseen laskenta

Tammisaaren virtaaman laskentaa varten kalibroitiin pinta- ja pohjamittauspisteitä vastaavien virtausalojen jakokertoimet  $k_{pi}$  ja  $k_{po}$  sekä nopeuden painokertoimet  $\beta_{pi}, \beta_{po}$  (ks. kuvat 8 ja 9) kerrostumisen suhteen erilaisille jaksolle. Tarkastelujaksot olivat kerrostunut, kerrostumaton ja jääpeitteinen aika. Virtausalat ja painokertoimet määritettiin niin, että Tammisaaren salmista merelle poistuva nettovirtaaman kuukausikeskiarvo on mahdollisimman lähellä valuma-alueelta tulevan virtaaman kuukausiarvoa (ks. kuva 36).

Kun mittareita vastaavat virtausalat ja painokertoimet oli kalibroitu, laskettiin mittausjaksolle 25.10.1995–8.12.1996 nettovirtaama (QNET) sekä brutto si-



Kuva 8. Kaavio pinta- ja pohjamittauspisteitä vastaavien virtausalojen jakokertoimien ( $k_{pi}$  ja  $k_{po}$ ) määrittämissuhteista.  $k_{pi} = A_{pi} / (A_{pi} + A_{po})$ .  $k_{po} = A_{po} / (A_{pi} + A_{po})$ .  $A_{pi}$  = pintamittaria vastaava poikkileikkausala ( $m^2$ ).  $A_{po}$  = pohjamittaria vastaava poikkileikkausala ( $m^2$ ).



Kuva 9. Kaavio pinta- ja pohjamittauspisteitä vastaavien virtausnopeuksien painokertoimien ( $\beta$ ) määrittämisperiaatteista.  $\beta_{pi} = v_{pi}/v_{pi}$ ,  $\beta_{po} = v_{po}/v_{po}$ ,  $v_{pi}$  = pintakerroksessa mitattu virtausnopeus ( $\text{cm s}^{-1}$ ).  $v_{pi}$  = pintakerroksen keskimääräinen virtausnopeus ( $\text{cm s}^{-1}$ ).  $v_{po}$  = pohjakerroksessa mitattu virtausnopeus ( $\text{cm s}^{-1}$ ).  $v_{po}$  = pohjakerroksen keskimääräinen virtausnopeus ( $\text{cm s}^{-1}$ ).

sään- ja ulosvirtaus (QIN ja QOUT) molempien salmien koko yhteispinta-alalle sekä pinta- ja pohjakerroksen virtaukselle erikseen. Nettovirtaama laskettiin edestakaisin vaihtelevan virtauksen aritmeettisena viikkokeskiarvona. Brutto sisään- ja ulosvirtaama laskettiin pelkästään vastaaviin suuntiin suuntautuneiden virtausahavaintojen viikkokeskiarvoina.

Tammisaaren ja Vitsandin pinta- ja pohjamittareiden sähkönjohtavuus- ja lämpötilamittausten perusteella laskettiin virtaavan veden suolaisuus ja tiheys ajalle 25.10.1995–8.12.1996.

## 2.5.6 Tiheysvirtauksen ja rannikkoalueen syvänveden kumpuamisen mittaaminen syksyllä 1997

Syksyllä lahden happivaroja uusivat meriveden sisäänvirtauspulssit ovat luonteeltaan osittain tiheysvirtauksia, joiden syntyyn rannikkoalueen syvänveden kumpuaminen saattaa vaikuttaa. Edellä kuvattu virtausten regressiotarkastelu ei selvittä tiheysvirtausten ja kumpuamisen välistä yhteyttä. Siksi niiden välistä riippuvuutta tarkasteltiin vuoden 1997 syksyllä erillisellä virtausmittauksella.

Pohjanpitäjänlahden suualueen sisäänvirtauksen ja horisontaalisen tiheysgradientin kehittymistä seurattiin 16.10.–26.11.1997 Tvärminnen itäpuolella, Vitsandin ja Tammisaaren salmissa (ks. kuva 6). Tvärminnen itäpuolella olevaan syvänneväylään asennetulla virtausmittarilla seurattiin virtausta, lämpötilaa ja sähkönjohtavuutta 5 m ja 15 m syvyydessä. Samoja muuttujia mitattiin myös pohja lähellä Vitsandin salmassa ja Tammisaaren länsisalmissa, Vitsandissa 6 m syvyydessä ja Tammisaareissa 4,5 m syvyydessä (taulukko 4).

Meriveden ja lahtialueen tiheyseron ts. horisontaalisen tiheysgradientin vaikutusta sisäänvirtaukseen tarkasteltiin graafisesti.



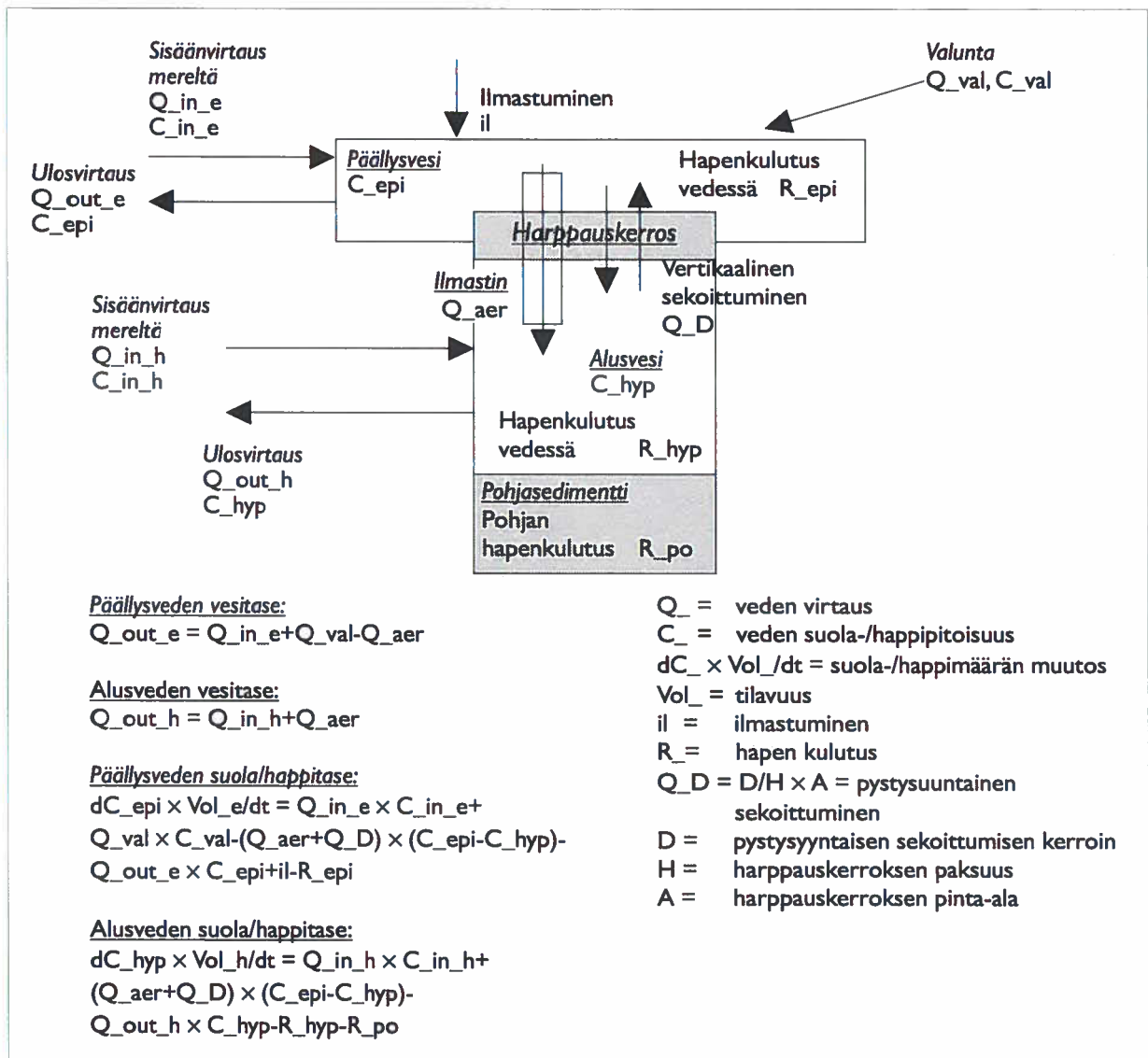
## 2.6 Happi- ja suolataseiden laskenta

### 2.6.1 Taseiden komponentit

Pohjapitäjänlahden happi- ja suolatase koostuu pääasiassa samoista komponenteista kuin niitä ohjaileva vesitase (ks. kuva 10). Taseiden pääkomponentit ovat sisään- ja ulosvirtaus merelle, sisäänvirtaus valuma-alueelta, vertikaalinen sekoittuminen sekä varaston muutos. Vertikaalinen sekoittuminen koostuu luontaisesta sekoittumisesta sekä hapetuspumpuilla aikaansaadusta keinotekoisesta sekoittumisesta. Hapen taseeseen vaikuttaa lisäksi hapen kuluminen vedessä ja pohjasedimentin pinnalla sekä ilmastuminen veden ja ilman rajapinnalla.

Tasetarkastelussa ja -mallissa ei huomioitu vedenkorkeuden ja kerrostumisen vaihtelua. Vedenkorkeuden vaihtelusta aiheutuvat tilavuuden muutokset kumoutuvat pidemmällä aikavälillä. Harppauskerroksen paksuus vaihtelee, mutta sen syvyys pysyy melko vakiona.

Tasekomponentit määritettiin päällys- ja alusvedelle erikseen. Tasekomponenttien laskemiseen tarvittavat virtausmittaukset ja muut määritykset on esitetty luvussa 2.5.



Kuva 10. Pohjanpitäjänlahden vesi- ja ainetasekaavio.



Meriveden sisäänvirtauksen mukana lahdelle tulevan ainevirtaaman laskemiseen tarvittiin Tammisaaren salmissa mitatut virtausnopeudet ja niiden perusteella laskettu virtaama sekä sisään virtaavasta vedestä määritetty ainepitoisuus. Alusvedeen tuleva vesimäärä erotettiin salmen kokonaisvirtaamasta tiheyden perusteella. Salmen pintaa tai pohjaa pitkin virtaava vesi laskettiin alusvedeen tulevaksi, kun sen tiheys oli suurempi kuin alusveden tiheys. Loppu salmen virtaamasta laskettiin kohdistuvaksi päällysveteen. Ainevirtaama saatiin virtaaman ja ainepitoisuuden tulona.

Valuma-alueelta päällysveteen tuleva ainemäärä laskettiin havaitun virtaaman ja pitoisuuden tulona.

Hapetuspumppun siirtämä ainemäärä saatiin pumpatun vesimäärän ja päällysvedestä määritetyn pitoisuuden tulona.

Vertikaalisen sekoittumisen synnyttämä ainevirtaama ( $m$ ,  $\text{kg d}^{-1}$ ) laskettiin jäljempänä kuvattavassa tasemallisessa määritetyn sekoittumiskertoimen ( $D$ ,  $\text{m}^2 \text{d}^{-1}$ ) sekä päällyys- ja alusvedessä havaittujen pitoisuuksien avulla (kaava 7).

$$m = \frac{D}{H} \times A \times (C_{EPI} - C_{HYP}) \quad (7)$$

missä:

$H$  = päällyys- ja alusveden painopisteiden etäisyys (m)

$A$  = harppauskerroksen pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$C_{EPI/HYP}$  = päällyys-/ alusveden ainepitoisuus ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

Aineiden ulosvirtaus on laskettu olettaen tilavuuden pysyvän vakiona ts. sisäänvirtausta vastaava vesimäärä myös poistuu lahdelta merelle. Poistuva ainevirtaama laskettiin kertomalla lahdessa havaittu pitoisuus ulosvirtauksella. Alus- ja päällysveden välillä hapetuspumppuista johtuva veden vaihto otettiin huomioon alusvedestä poistuvaa vesi- ja ainemäärää laskettaessa. Päällysvedessä otettiin lisäksi huomioon valuma-alueelta tuleva virtaama.

Hapen taseen laskemiseen tarvittava hapenkulutus saatiin jäljempänä kuvattua tasemallista.

## 2.6.2 Tasemalli

Hapettimien vaikutusta alusveden suola- ja happipitoisuuteen arvioitiin tasemallilla. Mallista, johon sisältyy edellisessä luvussa luetellut komponentit, ratkaistiin happi- ja suolapitoisuus numeerisesti päivän aika-askeleella sekä kalibroitiin vertikaalisen sekoittumisen ja hapenkulutuksen kertoimet. Tasemallin avulla määritettiin alusveden keskimääräiset suola- ja happitaseet.

Tammisaaren pohjoispuolinen lahtialue jaettiin syvyyssuunnassa alus- ja päällyysvesikerrokseen. Harppauskerrosta ei otettu huomioon erikseen. Painopistemallin kalibroinnissa asetettiin alusveden taseiden oikeaan kuvaamiseen. Päällysveden taseet eivät olleet ongelman kysymyksenasettelun kannalta aivan yhtä oleellisia, koska pääosa alusveden happi- ja suolatäydennyksestä tulee suoraan sisäänvirtaavan meriveden mukana. Lisäksi päällysveden happitila on jatkuvasti lähellä kyllästyspistettä. Päällyys- ja alusveden rajapinnan syvyyttä haarukoitiin 10 m ja 15 m väliltä sen vuoksi, että harppauskerros oli vuosina 1995 ja 1996 alkusyksystä hapetusta aloitettaessa hyvin jyrkkä ja sijaitsi 10 m syvyydessä, mutta loiveni merkittävästi suolaisen meriveden työntyessä Tammisaaren pohjoispuoliseen päällysveteen. Toisaalta oli oletettavissa hapetuspumppauksen vaikutusten kohdistuvan etupäässä harppauskerroksen alapuoliseen alusvedeen, joka sijaitsi syksyllä 15 m syvyydestä alaspäin (vrt. luku 2.3).

Happimalliin sisältyneet prosessit, muuttujat ja parametrit on esitetty prosessimatriisissa (taulukko 5). Päälyys- ja alusvedelle sekä pohjasedimentille annettiin hapenkulutuskertoimet, joita korjattiin lämpötilan mukaan.

Taulukko 5. Prosessimatriisi. Happimallin prosessit, prosessinopeudet ja vastaavat stökiometriset kertoimet. Muuttujien selitykset taulukossa 6.

Prosessi	Stökiometrinen kerroin ( $C_{O_2}$ )	Prosessinopeus
1. Pohjan hapenkulutus	-1	$k_{O_2BOT} \times \frac{1}{H} \times (1 - \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}}) \times \theta_{O_2}^{(T-20)}$
2. Veden hapenkulutus	-1	$k_{O_2} \times (1 - \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}}) \times \theta_{O_2}^{(T-20)}$
3. Ilmastuminen	1	$v_{O_2} \times (C_{O_2SAT} - C_{O_2}) / H$

Taulukko 6. Happimallin muuttujat ja parametrit.

Muuttuja	Selitys
$k_{O_2BOT}$	Pohjan hapenkulutus ( $g\ m^{-2}\ vrk^{-1}$ )
$H$	Vesikerroksen keskimääräinen syvyys (m)
$k_{O_2}$	Veden hapenkulutus ( $g\ m^{-3}\ vrk^{-1}$ )
$K_{O_2}$	Hapenkulutuksen happi-puolikyllästysvakio ( $g\ m^{-3}$ )
$C_{O_2}$	Veden happipitoisuus ( $g\ m^{-3}$ )
$\theta_{O_2}$	Lämpötilakorjauksen kerroin
$v_{O_2}$	Hapen vaihtokerroin ilman ja veden rajapinnalla ( $0,7 \times 10^{-8}\ m\ vrk^{-1}$ , jääpeitteisenä aikana $0\ m\ vrk^{-1}$ )
$C_{O_2SAT}$	Hapen kyllästyspitoisuus vedessä lämpötilan funktiona $= 1000 \times (14,652 - 0,41022 \times T + 0,007991 \times T^2 - 7,7774 \times 10^{-5} \times T^3)$

Mallin numeerinen ratkaisu sekä hapenkulutuskertoimien optimointi simplex- ja secant-menetelmällä tehtiin Aquasim-ohjelmistolla (Reichert 1994a,b ja 1995).

Päälyys- ja alusveden välille määritettiin sekoittumiskerroin D (kaava 7). Hapetuspumpuilla päälyysvedestä alusveteen pumpattu vesimäärä annettiin mallissa konvektiona päälyysvedestä alusveteen. Pumpattu vesimäärä oli  $2,7\ m^3\ s^{-1}$ .

Kalibrointi suoritettiin käyttäen Aquasim-ohjelmistossa olevia estimointi algoritmeja. Käytössä oli Secant- ja Simplex-algoritmit. Simplex-menetelmällä saadaan haettua nopeasti paikallinen optimi, kun ollaan kaukana optimista. Secant-menetelmällä löydetään tarkka arvo, kun ollaan jo lähellä paikallista optima.

Vertikaalinen sekoittumiskerroin D oli ainut tuntematon termi alusveden suolatasessa. Se määritettiin kerrostuneelle ajalle (sisältää jääpeitteisen ajan) ja loppusyksyn heikommin kerrostuneelle jaksolle erikseen. Jaksoja vastaava keskimääräinen sekoittumiskerroin optimoitiin vertaamalla alusvedessä havaittuja ja laskettuja suolapitoisuuksia laskentajaksolla 24.10.1995–1.2.1997.

Kun vertikaalinen sekoittumiskerroin oli määritetty, optimoitiin hapenkulutuskertoimet sekä niiden lämpötilakerroin vertaamalla alusveden havaittua ja laskettua happipitoisuutta vastaavalla laskentajaksolla.

## 2.7 Virtausten ja veden laadun kolmiulotteinen laskenta

### 2.7.1 Laskentamenetelmät ja niiden soveltaminen

Veden virtausten, kulkeutumisen ja veden laadun kolmiulotteisia matemaattisia malleja, FINNFLOW ja FINNQUAL, on sovellettu useaan otteeseen kymmenien rannikkoalueiden vesistövaikutusten tarkasteluun (Koponen ym.1992, Virtanen ym. 1993, Koponen ym.1994). Neljännos sovelluksista on tehty ulkomaille. Mallien perusajatuksena on veden virtausten ja pitoisuusmuutosten laskeminen yleisten lainalaisuuksien pohjalta ja samalla tavoin vaihtelevina kuin luonnossakin.

#### Virtausten laskenta

Virtauksia säätelevät lainalaisuudet ovat nykyisissä muodoissaan olleet vakiintuneina tiedossa jo pari sataa vuotta. Tietokoneiden yleistyttyä 1950-luvun lopulta lähtien niitä on alettu käyttää myös merialueiden virtausten laskentaan.

Veden pinnalta virtauksiin vaikuttaa ennen kaikkea tuuli, mutta jääkannen alla myös jääkitka. Pohjalla puolestaan pohjakitka hidastaa virtauksia. Näiden vaikutus esitetään reunaehtoina, jotka pystysuuntaisen viskositeetin (veden sisäisen kitkan) ja vastuskertoimien välityksellä kytkevät rajapintoja veteen. Virtausten mahdottomuus (tai vähäisyys) pohjan, pinnan ja rantojen läpi täydentää reunaehtoja yhdessä jokien, päästöjen ja merien reunavirtaamien kanssa.

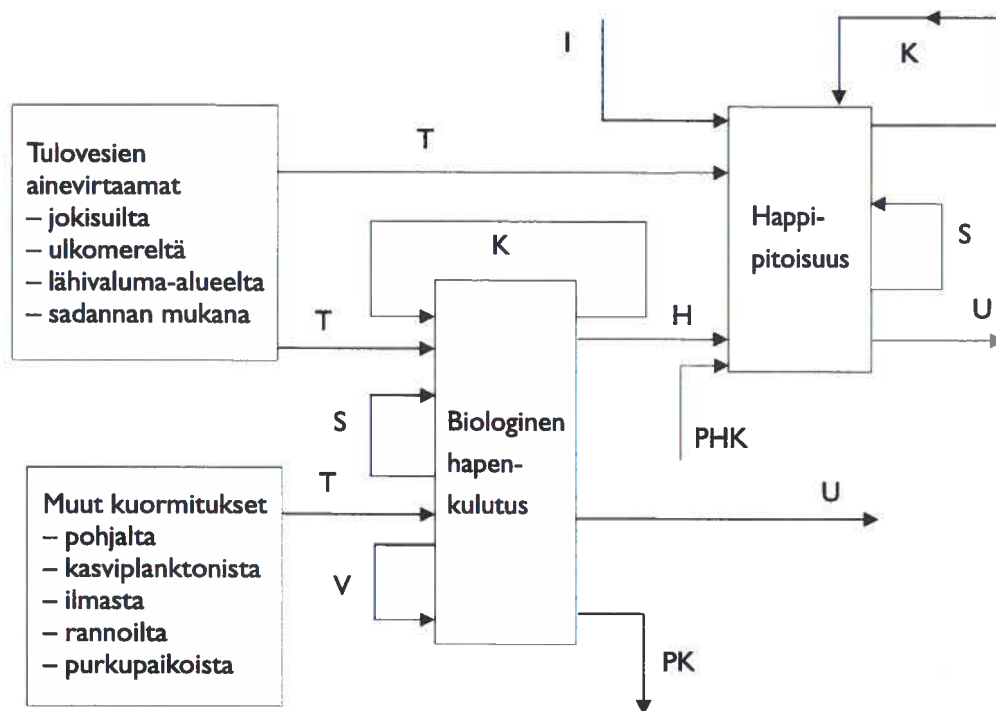
Reunaehtojen lisäksi vedessä virtauksiin vaikuttavat paine-erot, maan pyörimisliike (ns. Coriolis-voimana), veden sisäinen kitka sekä nopeuserojen kulkeutuminen virtausten mukana (ns. advektio) samalla tavoin kuin pitoisuuserotkin kulkeutuvat. Paine-erot määräytyvät suoraan ilmanpaineesta ja veden pinnan korkeudesta sekä veden tiheyseroista. Matemaattisesti näiden tekijöiden vaikutukset on tiivistetty ns. liikeyhtälöiksi (liite 2).

Liikeyhtälöiden rinnalla virtauksia ja veden korkeuden vaihteluita sitoo toisiinsa veden yhtenäisyys (vettä ei synny tyhjästä eikä häviä olemattomiin) sekä toissijaisempina tekijänä veden vähäinen kokoonpuristuvuus. Matemaattisesti tämä yhteys ilmenee ns. jatkuvuusyhtälönä. Reunaehtojen ja yhtälöiden matemaattisia lausekkeita on koottu liitteeseen 2.

#### Veden laadun laskenta

Pitoisuuksien ja veden laatua kuvaavien muiden ominaisuuksien muutokset vedessä johtuvat kuormituksista, joita veteen purkautuu jokien ja ympäröivien merialueiden lisäksi pistelähteistä, pohjalta, ilmasta tai suoraan rannoilta. Kaikki kuormitusvaikutukset kulkeutuvat vedessä virtausten mukana, sekoittuvat pyörteiden ja nopeuserojen vaikutuksesta sekä samaan aikaan muuntuvat vallitsevista olosuhteista riippuen. Kulkeutumisen ja sekoittumisen rinnalla tavallisia muuntumistapoja ovat vajoaminen ja saostuminen pohjalle sekä biologiset ja kemialliset reaktiot.

Pohjanpittäjänlahden sovelluksessa on keskitytty erityisesti liuenneen hapen ja biologisen hapenkulutuksen väliseen vuorovaikutukseen. Näitä on koottu kuvaan 11. Kulkeutuminen (K) ja sekoittuminen (S) vain siirtävät pitoisuuksia paikasta toiseen laskenta-alueen sisällä, päästöt ja tulovirtaamat (T) ja ulosvirtaus (U) puolestaan laskentatilavuuden reunojen yli. Vajoaminen (V) keskittää pitoisuuksia ylemmistä alempiin vesikerroksiin. Kunkin kohdan alimmassa kerroksessa vastaava vaikutus jatkuu pohjalle kertymisinä (PK). Ulosvirtausten tapaan se poistaa pitoisuuksia laskentatilavuuden ulkopuolelle. Veden ulkopuo-



Kuva 11. Vedenlaatumallin rakenne-kaaviokuva. *T* = tulovirtaamat ja kuormitukset, *K* = kulkeutuminen vedessä virtausten mukana paikasta toiseen, *S* = sekoittuminen, *V* = vajominen vedessä pohjalle osumatta, *PK* = pohjalle kertyminen, *PHK* = pohjakertymien eli sedimentin hapenkulutus, *H* = hapen kuluminen biologisen hapenkulutuksen mukana, *I* = ilmastuminen ja *U* = ulosvirtaus.

lelta vaikuttavat happipitoisuuksiin hapen liukeneminen veteen eli ilmastuminen (*I*) pinnalla ja pohjakertymien hapenkulutus (*PHK*) pohjimmaisessa kerroksessa. Keskinäisenä yhteytenä vedessä on hapen kuluminen biologisen hapenkulutuksen vähetessä (*H*).

### Numeerinen ratkaisumenetelmä

Yhtälöiden soveltamiseksi käytäntöön jaetaan vesialue vaaka- ja pystytasoissa pienempiin osiin, ns. hilakoppeihin, joiden välisten erojen kehittymistä laskennassa tarkastellaan. Käytetyssä laskentaohjelmistossa vesikerrosten paksuus voi syvyysuunnassa vapaasti vaihdella, mutta kerrospaksuudet pysyvät yhtenäisinä läpi tarkastelualueen. Vaakasuunnassa alue voidaan jakaa suoraviivaisin, suorakulmaisoin linjoin hilaverkoksi.

Vaakatason hilaverkko valitaan nykyisin mieluiten tasaväliseksi ja pohjois-etelä -suuntaiseksi, jolloin eri sovellusten alueita on helpompi ja selvempi kytkeä yhteen keskenään. Työn rinnalla on kehitetty sovelluskäyttöön ja testauksilla varmistetuksi laskentamenetelmä, jossa vaakatason erotustarkkuutta voidaan valituilla alueilla tuntuvastikin tihentää jopa useammissa vaiheissa. Samalla eri erotustarkkuuden laskelmat etenevät rinnakkain ja koko ajan täydessä vuorovaikutuksessa keskenään (Koponen ja Ylinen 1998, Koponen 1997, Kiirikki ym. 1998). Pohjanpitäjänlahden virtaukset voidaan näin kytkeä osaksi Suomenlahden virtauskenttää. Tässä työssä Suomenlahden vaikutukset syötettiin kuitenkin tätä karkeampina reuna-arvoina, koska laskentamenetelmää ei ollut työn alkaessa vielä lopullisesti varmistettu.

Numeeristen lukuarvojen ratkaisemiseen käytetään YVA Oy:n malleissa valtaosin mahdollisimman yksinkertaisia, ensimmäisen ja toisen kertaluvun, kahden perättäisen aika-askeleen sekä sivuttaisten ja päällekkäisten naapuriruu- tujen välisiin yhteyksiin rajoittuvia lausekkeita. Niiden etuina on ennen kaikkea laskennan varmuus, selkeä tarkistettavuus, sujuva muunneltavuus ja joustava avoimuus jatkokehitykselle.

### **Mallin soveltaminen Pohjanpitäjänlahdelle**

Pohjanpitäjänlahden tarkasteluihin oli laskentaa kehitettävä yhtäältä hapekkaan päällysveden pumppauksen ja sen vaikutusten kuvauksen tarkentamiseksi sekä toisaalta levien aiheuttaman hapen kulutuksen kuvaamiseksi mittaus- ja kirjalli- suustietojen pohjalta, koska kasviplanktonin biomassan kehitystä ei laskettu mallissa. Huomiota suunnattiin näiden lisäksi mm. pystysuuntaisen sekoittu- misen ja tiheyserojen välisiin yhteyksiin.

Päällysveden pumppauksen vaikutusten kuvaamiseen oli edeltäneissä Kal- laveden sovelluksissa (Lauri ja Virtanen 1995) käytetty äärimmäisen yksinker- taistettua laskentatapaa, jossa pumppujen kohdilla kaikkien vesikerrosten pitoi- suudet sekoitettiin tasan keskenään. Likimääräiskuvaus yhtäältä liioitteli pump- pujen sekoitustehoa, mutta samalla jätti huomiotta pumppauksen vaikutuksen alusveden virtauksiin. Ensimmäisenä kehitysaskeleena lisättiin laskentaan pump- pausteho siirtämään vettä pinnalta pohjalle. Tällöin kerrostuneisuus säilyi kar- keinta kuvausta paremmin, mutta alusveteen aiheutuneet virtaukset jäivät edel- leen aliarvioiduiksi.

Toisessa vaiheessa laskettiin pumppauksen aiheuttamat virtaukset. Tulos- ten siirtoa kulkeutumisen laskentaan vaikeutti kerrosrajan muuttuminen pump- pauksen edetessä. Merkitys laskennassa lisäksi korostui, koska pohjan ja pinnan lämpövuohon vaikuttavia tietoja tai niiden vaikutuksia ei sisältynyt sovelluk- seen. Laskennassa tähdättiin sen vuoksi pumppausjakson keskimääräistä ker- rostumista vastaavien vaikutusten laskentaan. Kolmannessa vaiheessa liitettiin myös pumppauksen mukana siirtyvien tiheyserojen ja niiden vaikutusten tar- kastelu virtausten laskentaan.

Levien hengityksen (respiraation) ja kuolleena hajoamisen aiheuttama ha- penkulutus syötettiin lisäkuormituksena laskennan pintakerrokseen. Sen lukuar- vot määritettiin todetuista klorofylli a:n mittaustuloksista, niiden likimäärin osoit- tamasta kasvusta, biologisen hapenkulutuksen sekä hajoamis- ja hengityshävi- öiden välisistä suhteista sekä biologisen hapenkulutuksen ja biomassan vähene- misnopeuksien mahdollisista eroista.

### **Virtauskenttien yhdistäminen kulkeutumisen laskentaan**

Mittaustulosten käsittelyssä ja tulokinnassa virtausnopeuksia tarkasteltiin jaotel- tuina vuoden mittaan kolmeen eriluonteiseen jaksoon: avoveden jyrkästi kerros- tuneeseen ja heikommin kerrostuneeseen sekä jääpeitteiseen kauteen (vrt. luku 2.5.). Erot eri tilanteiden virtausriippuvuuksien kesken jäivät kuitenkin melko vaikeiksi sekä mittaustuloksissa että laskennan herkkyyssvertailuissa. Tällöin keskittyminen yhteen kerrostumistapaan oli perusteltua. Tämän mukaisesti vir- tausten ja kulkeutumisen laskentaan käytettiin kaikkialla tarkastelujaksoille yhtäläisesti kerrostuneita oloja vuodenaajoista ja jääpeitteestä riippumatta.

Tuulten vaikutusta virtauksiin laskettiin lopulta vain ylimpään 12 metriin rajattuna. Jokivesien laskettiin purkautuvan eteläreunalta ulkomerelle ylimpään kolmeen metriin keskittyneinä. Vedenkorkeuden alenemiseen liittyvä ulosvirta- us otettiin sekin samasta pintakerroksesta. Tilavuusmuutosten kautta sen vaiku- tus ulottui silti kaikille syvyyksille vahvemmin kuin jokivesien vaikutus. Veden-



korkeuden nousuun liittynyt tulovirtaus syötettiin tasaisesti koko eteläreunan kaikilta syvyyksiltä poikkipintojen suhteessa.

Päällysveden pumppauksen aiheuttamien virtausten laskennassa keskityttiin etenkin kerrosten välisten tiheyserojen säilyttämiseen. Vesitasaisiin tarvittu paluuvirtaus ohjautui tällöin pääosin rantojen kautta, jolloin se jakautui laajalle alalle ja paljolti vaimeni.

### **Laskennan soveltaminen pumppujen vaikutusten tarkasteluun**

Veden siirron vaikutusten laskemiseksi määritettiin pumppauksen alus- ja päällysvesiin aiheuttamat virtauskentät vähentämällä päällysvedessä pumppauskohdan virtauksia ja vastaavasti lisäämällä tulovirtausta alusveteen pumppaustehoa vastaava määrä.

Keskimääräistä kerrostumista kuvaavien virtauskenttien tultua lasketuiksi, sovellettiin niiden vaikutuksia pitoisuuksien ja kulkeutumisen laskentaan. Pumppaustehoa vaihdeltiin sen mukaan kuin pumppuja tiedettiin olleen käynnissä. Pumput oli sijoitettu laskentahilaan niiden ilmoitetuille sijoituspaikoille, hilaruutuihin (29,51)–(29,54). Pumppujen vaikutuksia tarkasteltiin yhdistettyinä siten, että käytössä olleiden pumppujen yhteinen teho jaettiin aina tasan kaikille pumppauspaikoille riippumatta siitä, mitkä pumput olivat käynnissä. Kolmen pumpun yhteistehona käytettiin  $2,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , jolloin yhden pumpun aiheuttamaksi yhteistehoksi laskentaan tuli  $0,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

## **2.7.2 Laskennan varmistukset**

### **Virtauslaskennan varmistus mittauksin**

Virtauskenttien laskentatulosten varmistukseen käytettiin tämän tutkimuksen virtausmittauksia (luku 3.2) ja niiden tilastoanalyysin tuloksia. Merkittävyydeltään testattuina ja myös mittausoloista poikkeaviin tilanteisiin käytettävänä nämä soveltuvat parhaiten laskentatulosten ensivaiheen varmistuksiin.

Vertailussa keskityttiin erityisesti Tammisaaren siltojen tuloksiin, koska mitaustulosten riippuvuudet saatiin siellä varmin esiin ja koska tarkastelualueen sisäisen dynamiikan ja vuorovaikutusten osuus niissä oli ilmeisin. Vitsandin virtausten laskentatulokset määräytyivät melko suoraan tarkastelualueen reunavirtauksista, joten niiden osalta yhtäpitävyys mittausten kanssa oli hyvinkin läheistä.

Virtausnopeuksien mitaustulosten lisäksi testattiin virtausten laskentatuloksia myös hyvin pelkistettyjen olojen – esim. pelkän jokivirtaaman, pelkän vedennousun, pelkän pinnan aleneman – aiheuttamilla kulkeutumisvaikutuksilla. Huomattavan havainnollisina nämä auttoivat suuntaamaan laskentaa yleiskokemusten pohjalta luontevaksi oletettuun suuntaan, vaikkei nimenomaisia mitaustuloksia näistä erityistilanteista käytännössä voikaan saada vertailtaviksi. Johtokyvyn, lämpötilan ja syvyyden (eli paineen ja tiheyden) CTD-luotaukset sisältävät hyvinkin yksityiskohtaisia lyhyen ajan jakaumatietoja laskelmiin verrattaviksi, mutta tässä työssä niitä ei kokonaan saatu hyödynnetyiksi.

Virtausten varmistus keskittyy tässä ensi sijassa mitaustulosten regressioyhtälöiden ja laskentatulosten väliseen vertailuun. Näiden lisäksi vertailtiin mitattuja ja laskettuja virtausvaihteluita keskenään muutamilta lyhyehköiltä, merkitykseltään keskeisiltä ajanjaksoilta, sekä arvioitiin pelkistettyjen, luonnossa esiintyvien erityistilanteiden kulkeutumistuloksia.

Tammisaaren läntisen ja itäisen silta-aukon päällimmäisten mittareiden katsottiin edustavan yhdistettyinä likimain  $360 + 250 = 610 \text{ m}^2$ :n poikkipinta-alaa,

jolloin alimmaisille mittareille jäi vastaavasti  $200 + 75 = 275 \text{ m}^2$ . Virtausmallin syvyyskuvauksessa poikkipinnat eivät poikenneet näistä juuri ollenkaan: 0–3 metrissä oli poikkipintaa  $640 \text{ m}^2$  ja 3–4,6 metrissä  $320 \text{ m}^2$ . Soveltamalla mittauksista selvitettyjä riippuvuuksia vakio-oloihin, saatiin eri viiveiden vaikutukset yhdistetyiksi. Poikkipintojen ja virtausnopeuksien tuloina saatiin eri salmien virtaamat yhdistetyiksi ja laskentatuloksiin selkeästi vertailtaviksi.

### Veden laadun laskennan varmistus mittauksin

Veden laadun laskennan varmistuksiksi on loppukesältä 1995 ja vuodelta 1996 mitattu runsaasti veden happi- ja suolapitoisuuksia sekä lämpötilaa. Kootut havainnot valottivat jo sellaisinaan monipuolisesti ja luotettavasti lahden kehitystä ja tapahtumia. Samalla ne antoivat vankan ja vaativan pohjan laskentatulosten vertailukohdiksi. Biologisen hapenkulutuksen osalta varmistukset jäivät epäsuoriksi, koska tulokset olivat valtaosin alle analyysitarkkuuden. Aineistosta puuttui sellainen syksy, jolloinka pumppausta ei tapahtunut.

## 2.7.3 Tarkastelualueen, -olojen ja tilanteiden syöttö laskentaan

### Alue

Laskenta-alue ulottui lahden pohjoispäästä Lappohjan tasolle etelään. Alue oli noin 18 km pitkä pohjois-eteläsuunnassa ja noin 10 km leveä itä-länsisuunnassa. Se jaettiin laskentaa varten vaakatasossa 88 (pohjois-etelä)  $\times$  50 (itä-länsi) hilaruutuun. Kunkin ruudun sivun pituus, ns. erotustarkkuus oli 200 metriä. Pystysuunnassa merialue jaettiin vastaavasti kymmeneen kerrokseen, joiden alapinnat olivat 1, 3, 6, 10, 12, 15, 20, 25, 30 ja 35 metrin syvyydellä veden pinnan perustasosta, ellei pohja rajannut alinta vesikerrosta ylemmäksi tai ohuemmaksi. Alimman vesikerroksen paksuudeksi jäi näin ollen enimmillään viisi metriä.

Tarkastelualueen kunkin hilaruudun syvyydet luettiin merikorteista ja syötettiin laskennan pohjatiedoiksi. Vesialueen pinta-alaksi saatiin tällöin  $38,44 \text{ km}^2$ , vesitilavuudeksi 272,3 miljoonaa kuutiometriä ja keskisyvyydeksi 7,08 metriä. Varsinaisen Pohjanpitäjänlahden osuus Tammisaaren silloista pohjoiseen on pinta-alasta yli puolet ja tilavuudesta kolme neljäsosaa.

Käytetyllä 200 m  $\times$  200 m erotustarkkuudella etenkin tiheimpien kaislikoiden matalia rantavesiä jätettiin vaihtuvuuksiltaan hitaina laskennan ulkopuolelle. Kun toisaalta tärkeimmät syvänteet on erotustarkkuudesta huolimatta pyritty saamaan kuvatuiksi lähes mitatun syvyisinä, jäi Pohjanpitäjänlahden pinta-ala laskennassa 1–2 % aliarvioituksi, kun taas tilavuus tuli runsaat 5 % yliarvioituksi. Lahden keskisyvyyteen aiheutui tästä vajaan 10 %:n epätarkkuus, jonka vaikutusta tuloksiin ja johtopäätöksiin ei erikseen tarkistettu. Keskisyvyyden yliarviointi mallilaskelmissa on harvinaista. Sinänsä hilajaottelu useimmiten luonnostaan madaltaa keskisyvyyksiä ja mieluummin tasoittaa kuin korostaa syvyyseroja. Vaikutussuunnaltaan syvyyksien yliarviointi välittöminä seuraamuksineen liioitteli alusveden tilavuutta ja hidasti sen vaihtuvuutta.

Laskenta-alueen pintakerroksessa oli 4400 hilaruutua ja kaikissa kerroksissa yhteensä 44 000 hilakoppia. Vettä virtaa näistä 961:ssä ja 4205:ssä vastaavasti. Tarkastelualueen koilliskulmaan laskevat pohjoisesta Fiskarsinjoki sekä koillisesta Mustionjoki. Etelästä tarkastelualue liittyy kapeahkojen salmien kautta Suomenlahteen, sen vedenkorkeusvaihteluihin, virtauksiin ja tiheysjakaumiin.

Yhteyksiä Suomenlahteen laskennassa otettiin huomioon 400 metrin (kahden hilaruudun) leveydeltä ja 8,6–8,9 metrin syvyydeltä alueen lounaiskulmalta. Monia matalia, ahtaita ja sokkeloisia salmireittejä tästä itään sitä vastoin kä-

siteltiin suljettuina. Myös muuten jätettiin Tammisaaren eteläpuolelta kapeimpien salmien takaisia lahdenpohjia ja ahtaita reittejä laskennassa huomioon ottamatta.

Pisteiden sijainnit tarkastelualueella esitettiin hilaruudun etäisyyksinä alueen länsilaidalta, eteläreunalta ja pinnalta tässä järjestyksessä hilaruutuina (200 metrin monikertoina) ja laskentakerroksina. Kuvatun tarkastelualueen lisäksi oli työn alkuvaiheissa käytössä myös monia muita aluerajauksia likimain samoilla erotustarkkuuksilla. Alueista laajin ulottui etelässä Tvärminnen tasolle, suppein taas pisteen P12 vaiheille. Pohjois- ja itäsuuntaisen jaottelun ohella katsottiin muutamia tuloksia myös lahden pituussuuntaan (syvänneväylään) rajatussa pystytasossa.

## Virtaama- ja sääolot

Laskentasovellukset keskittyivät aluksi loppukesän 1995 ja vuoden 1996 lopun väliseen aikaan ja oloihin. Tältä väliltä on runsaimmin mittaustuloksia ja samalle ajalle sisältyvät myös molemmat pumppausjaksot. Taulukossa 7 on esitetty likimääräisiä kuukausikeskiarvoja tuon ajan virtaamista ja tuulista. Vedenkorkeudet ja valuma-aluevirtaamat on esitetty luvussa 3.2. kuvissa 35 ja 36.

Taulukko 7. Laskennassa käytettyjen valuma-alueen virtaamien  $Q$  ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), Hangosta 12 tunnin välein mitattujen veden nousujen ja laskujen  $Z+$  ja  $Z-$  ( $\text{cm}$  ( $28-31 \text{ vrk}^{-1}$ )), tuulen nopeuden skalaari- ja vektorikeskiarvojen  $W_{sc}$  ja  $W_v$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) sekä vektorikeskiarvon suuntien  $S_u$  (asteina pohjoisesta myötäpäivään) kuukausikeskiarvot lokakuusta 1995 joulukuuhun 1996.

Kuukausi	$Q$	$Z+ (-) Z-$	$W_{sc}$	$W_v$	$S_u$
Loka -95	11,2	166 - 172	9,57	7,01	238
Marras-95	17,7	219 - 233	8,41	2,84	343
Joulu -95	17,4	159 - 174	0,00	0,00	—
Tammi -96	10,5	87 - 115	0,00	0,00	—
Helmi -96	16,8	156 - 143	0,00	0,00	—
Maalis-96	9,2	77 - 78	0,00	0,00	—
Huhti -96	25,4	86 - 74	5,72	0,63	134
Touko -96	31,2	158 - 157	7,79	2,61	81
Kesä -96	20,5	98 - 80	5,80	3,11	251
Heinä -96	35,3	152 - 149	6,73	3,37	236
Elo -96	28,6	78 - 101	5,95	2,14	132
Syys -96	9,0	98 - 93	7,54	1,95	36
Loka -96	7,8	132 - 109	9,57	7,01	238
Marras-96	43,3	231 - 235	8,41	2,84	343
Joulu -96	38,1	192 - 173	6,87	1,38	302

Tuuli-, vedenkorkeus- ja virtaamatiedot syötettiin laskentaan puolen vuorokauden välein. Tuulen nopeuden skalaari- ja vektorikeskiarvojen suhde antaa käsitystä siitä, miten paljon kolmen tunnin välein mitattu tuulen suunta on puoli-vuorokausittain vaihdellut. Myös vedenkorkeuden vaihtelut yhdistettiin syöttötiedoiksi kolmen tunnin välein kirjatuista havainnoista. Näiden kuukausisummat olivat taulukon 7 puolen vuorokauden lukemiin verrattuina yleensä 2–2,5-kertaisia, voimakkaimpien vaihteluiden kausinakin 1,4-kertaisia. Kulkeutumis-  
ta määräävinä syöttötietoina käytettiin puolen vuorokauden vedenkorkeusmuutoksia ja tuulen vektorikeskiarvoja, hapettumista määräävänä syöttötietona puolestaan tuulen skalaarikeskiarvoa.

Tuuli- ja vedenkorkeustietojen hankinta määräytyi paljolti virtausmittaustulosten tulokinnan tarpeista ja keskittyi etenkin aluksi nimenomaan mittausjaksoille. Vedenkorkeustietoja oli koottuna ajalta 2.10.1995–9.12.1996. Alkuvuoden



1995 vedenkorkeuksina käytettiin laskennassa vuoden 1996 vastaavan ajankohdan tietoja ja 9.12.96 jälkeiselle laskentajaksolle vuoden 1995 tietoja.

Tuulitietoja oli koottuna 2.10.1995–3.10.1996 väliseltä ajalta. Pohjanpitäjänlahden jääpeitteen ajan 16.11.1995–8.4.1996 käytettiin tiedossa olleiden tuulien sijasta tyyniä oloja. Alkuvuoden 1995 jääpeitteen katsottiin kestäneen huhtikuun loppuun. Sen jälkeen 1.5.–1.10.1995 tuulina käytettiin kesän 1996 vastaavan ajankohdan tuulia. Vastaavasti loppuvuodesta 1996 käytettiin 4.10. lähtien vuoden loppuun asti edellisen vuoden saman ajan tuulia. Pumppujen pysäytykseen 20.–21.12.1996 mennessä ei veden tuolloin katsottu jääntyneen.

Valuma-aluevirtaamat päivitettiin havaintojen ja niistä johdettujen laskelmien mukaisiksi sitä mukaa kuin niitä saatiin tietoon. Niiden osalta vuosien 1995–1996 laskentajakson syöttötiedot olivat siis kauttaaltaan saatavissa olleiden parhaiden tietojen mukaiset. Ennakointi- ja ennustetarkoituksiin on silti myös virtaamien osalta varauduttava edeltäneiden vuosien tai keski- tai ääriolojen käyttöön.

## Kuormitukset

Jätevesikuormitus vuosina 1995 ja 1996 on esitetty luvussa 2.2. Taulukossa 8 on esitetty mallin syöttötietoina käytetyt BOD<sub>7</sub>-kuormitusarvot.

Taulukko 8. Mallin syöttötietoina käytetyt jätevedenpuhdistamoiden BOD<sub>7</sub>-kuormitukset (tn vrk<sup>-1</sup>). Gumnäsin ja Rögrundin päästöt ovat kuormitustarkkailun puolivuosisikeskiarvoja ja Skeppsholmenin päästöt neljännesvuosisikeskiarvoja.

		Pohja, Gumnäs	Tammisaari, Skeppsholmen	Tammisaari, Rögrund
1995	1.1.-31.3.	5,8	48,7	5,6
	1.4.-30.6.	5,8	18,0	5,6
	1.7.-30.9.	10,1	10,7	2,0
	1.10.-31.12.	10,1	13,3	2,0
1996	1.1.-31.3.	12,4	11,4	2,6
	1.4.-30.6.	12,4	24,1	2,6
	1.7.-30.9.	9,1	7,9	3,3
	1.10.-31.12.	9,1	19,5	3,3

Alueelle suoraan purkautuvan jätevesikuormituksen lisäksi aluetta kuormittavat mm.:

- jokien kautta tuleva kuormitus;
- suoraan lahdelle ja Tammisaaren eteläpuolen laskenta-alueelle lähivaluma-alueelta tuleva kuormitus;
- Suomenlahdelta (Lappohjan eteläpuolelta) tuleva kuormitus;
- laskeuma ilmakehästä Pohjanpitäjänlahdelle ja Tammisaaren eteläpuolen laskenta-alueelle;
- sisäinen kuormitus Pohjanpitäjänlahdelta ja Tammisaaren eteläpuolen laskenta-alueelta; sekä
- Pohjanpitäjänlahden ja Tammisaaren eteläpuolen laskenta-alueen perustuotannon hajoamisesta sekä siihen liittyvistä ja rinnastuvista muista tekijöistä välillisesti aiheutuvat sekundääriset vaikutukset.

Pistekuormitusten suuruus oli kohtuullisen hyvin tiedossa, mutta muiden kuormitusten suuruus jouduttiin päättämään harvoista mittaustuloksista tai epäsuorasti muista havainnoista. Päättelyperusteita ja niiden soveltamista käsitellään sen vuoksi tarkemmin seuraavaksi tässä luvussa.

## 2.7.4 Tulo-, reuna- ja alkupitoisuudet

### Jokien, lähivaluma-alueen, sadannan ja laskeuman yhteisvaikutus

Jätevesipäästöjen lisäksi myös jokivesistä oli mittaustietoa. Virtaamia mitataan Peltokoskelta päivittäin ja veden laatua jokisuun läheltä ainakin yhdeltä havaintopaikalta vähintään kuukausittain.

Peltokosken virtaamat täydennettiin kuvaamaan kokonaisvaluntaa, kaikkea makeanveden virtausta tarkastelualueelle, käyttämällä hyväksi valuma-alueiden pinta-alasuhteita ja läheisen pienen valuma-alueen seurantatuloksia. Tällä tavoin kokonaisvalunnaksi saatu varsinaisten jokivirtaamien, lähivaluma-alueen ja meren pinnalle suoraan lankeavan nettosadannan summa syötettiin yhdistetyksi tulovirtaamaksi jokisuilta Pohjanpitäjänlahdelle. Valuma-aluevirtaamia on tarkemmin esitetty luvussa 2.5.1.

Biologista hapenkulutusta kuvaavia BOD<sub>7</sub>-tuloksia oli hyvin vähän, koska pitoisuudet rajoituivat valtaosin mittausherkkyyden 2–3 mg l<sup>-1</sup> tuntumaan tai sen alapuolelle. Mustionjoen kemiallisen hapenkulutuksen (COD<sub>Mn</sub>) ja eloperäisen hiilen (TOC) ainevirtaamat olivat suunnilleen yhtä suuret. Ne olivat puolen vuoden keskiarvoina vuonna 1995 noin 20 ja 5 tn vrk<sup>-1</sup> ja vuonna 1996 suunnilleen samansuuruiset kuin pitkän ajan keskiarvo eli noin 10 tn vrk<sup>-1</sup> (kuva 5 a, taulukko 2). Mittaustulosten puuttuessa BOD<sub>7</sub>:n ensimmäisenä likiarvona käytettiin monin paikoin kymmenesosaa COD<sub>Mn</sub>:sta, ts. 1000 kg vrk<sup>-1</sup>, pitoisuutena likimain 0,5 mg l<sup>-1</sup>.

Mustion- ja Fiskarsinjokien pitoisuuksien lisäksi ei alueelta mitattu muiden kokonaisvaluntaan yhdistettyjen valumavesien pitoisuuksia. Tästä syystä käytettiin kokonaisvalunnan pitoisuuksina samoja pitoisuuksia kuin jokivesille. BOD<sub>7</sub>:lle syötettiin laskentaan etenkin tulvajaksoina edellä pääteltyjä väkevämpiä pitoisuuksia, hetkittäin jopa 3,5 mg l<sup>-1</sup> (taulukko 9). Jokien, lähivalunnan, sadannan ja laskeuman yhteiseksi BOD<sub>7</sub>-kuormitukseksi tulee niistä vuosien 1995–96 keskiarvona noin 4000 kg vrk<sup>-1</sup>.

### Mereltä tulevat vaikutukset

Ulommille merialueille yhteydessä olevan eteläreunan veden vaihdunta määräytyy vedenkorkeusvaihtelusta ja jokivirtaamasta. Veden nousu 2 cm h<sup>-1</sup> = 48 cm vrk<sup>-1</sup> saadaan 38,44 km<sup>2</sup>:n laskenta-alueelle, kun tulovirtaamien ja ulosvirtauksen erotus on 213,56 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Sisään virtaavat pitoisuudet arvioitiin kerroksittain karkeina likiarvoina mm. pisteen p14 TOC-pitoisuuksien perusteella (taulukko 9).

Virtaamalla 20 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> ja BOD<sub>7</sub>-pitoisuudella 2 mg l<sup>-1</sup> tulee valunnan mukana kuormitusta tarkastelualueelle 3456 kg vrk<sup>-1</sup>. Samaan vaikutukseen ulkomeren puolelta johtaa virtaama 80 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> pitoisuudella 0,5 mg l<sup>-1</sup>. Tarkastelualueen jätevesipäästöt ovat näin lasketusta jokikuormasta 1 % ja jokikuormaan sisältyvät Pinjaisten päästöt noin 3 %.

Suolapitoisuudet pidettiin reunoilla vakioina, joessa 0 g kg<sup>-1</sup>, merellä pinnassa (0–6 m) 2 g kg<sup>-1</sup> ja syvemmällä meressä (yli 6 m) 6 g kg<sup>-1</sup>.

### Alkupitoisuudet

Laskennan alkutilanteen lähtöpitoisuudet määritettiin viimeisen laskentaa edeltäneen mittaushetken tuloksista. Kunkin mittauskerroksen likimääräiset keskiarvot syötettiin kyseisten syvyysvyöhykkeiden alkuarvoiksi, useimmiten koko laskenta-alueelle vaakatasossa tasan jaettuina. Alkupitoisuuksien sisältämän ainemäärän suuruutta kuvaa, että jos koko tilavuuden keskipitoisuus on 1 mg l<sup>-1</sup>, niin koko laskenta-alueella (0,27 km<sup>3</sup>) on 272 tonnia kyseistä ainetta. BOD<sub>7</sub>:n al-

Taulukko 9. BOD<sub>7</sub>:lle ja happipitoisuudelle (O<sub>2</sub>) 1995 - 96 käytetyt tulo- ja reunapitoisuudet.

Ajanjakso	Joen BOD <sub>7</sub> (mg l <sup>-1</sup> )	Meren BOD <sub>7</sub> (mg l <sup>-1</sup> )	Meren O <sub>2</sub> 0–6 m (mg l <sup>-1</sup> )	Meren O <sub>2</sub> 6–9 m (mg l <sup>-1</sup> )
1.1.–31.3.95	0,5	0,5	12,0	12,0
1.4.–7.5.95	2,0	1,0	12,0	11,0
8.5.–7.6.95	2,0	0,5	11,0	9,0
8.6.–31.7.95	2,0	0,5	10,0	8,0
1.8.–30.9.95	2,0	0,5	10,0	6,0
1.10.–31.10.95	2,0	0,5	10,0	8,0
1.11.–30.11.95	2,0	0,5	11,0	9,0
1.12.95–31.3.96	0,5	0,5	12,0	12,0
1.4.–7.5.96	2,0	1,0	12,0	11,0
8.5.–7.6.96	2,0	0,5	11,0	9,0
8.6.–31.7.96	2,0	0,5	10,0	8,0
1.8.–30.9.96	2,0	0,5	10,0	6,0
1.10.–31.10.96	3,5	0,5	10,0	8,0
1.11.–30.11.96	2,5	0,5	11,0	9,0
1.12.–31.12.96	0,5	0,5	12,0	12,0

kuarvot alkuvuodesta 1995 (0,2 mg l<sup>-1</sup> 0–12 m:ssä ja 1,9 mg l<sup>-1</sup> 12 metrin alapuolella) merkitsevät alkutilanteeseen 107 tonnin BOD<sub>7</sub> varantoa. Tämä vastaa edellä esimerkeiksi luonnehdittujen joki- ja reunakuormitusten (2 x 3,5 tn vrk<sup>-1</sup>) 15 vrk:n päästöjä. Happipitoisuuden alkuarvot tammikuussa 1995 olivat syvyysvyöhykkeittäin: 14 mg l<sup>-1</sup> 0–3 m, 13 mg l<sup>-1</sup> 3–10 m, 11 mg l<sup>-1</sup> 10–15 m ja 6 mg l<sup>-1</sup> 15 metrin alapuolella.

### 2.7.5 Pohjakertymien hapenkulutus

Pohjakertymien hapenkulutusta on Sällvikin syvänteestä mitattu kesällä vuonna 1995 ja loppusyksyllä vuonna 1997. Heinäkuussa vuonna 1995 hapenkulutusta mitattiin inkuboimalla neljää mahdollisimman häiriintymätöntä sedimentinäytettä näytteenottoputkissaan 3 tuntia 4 °C:een lämpötilassa (Leena Karjala, Merentutkimuslaitos, suullinen tiedonanto 11.7.1995). Hapenkulutus mitattiin sedimentin päällä olevasta vedestä. Sedimentin hapenkulutukseksi saatiin 230 ± 44 ml m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup> eli noin 330 mg m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup>. Verrattuna Merentutkimuslaitoksen muihin Suomenlahden tuloksiin vuodelta 1995 (180–450 ml m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup>, Leena Karjala, Merentutkimuslaitos, suullinen tiedonanto 11.7.1995) Pohjanpitäjänlahden mittaustulos oli melko alhainen. Mittausten yhteydessä havaittiin sedimentistä vapautuvan runsaasti kaasua, mikä viittaa siihen, että sedimenttiin on varastoitunut anaerobisen hajotuksen seurauksena kemiallista hapenkulutusta.

Syksyllä vuonna 1997 sedimentin hapenkulutusta mitattiin mikroelektrodimittauksista saatavaan hapen diffuusionopeuteen perustuvalla menetelmällä (Väisänen ja Hellsten 1997). Mittaus tehtiin yhdestä näytteestä ja sedimentin hapenkulutukseksi saatiin 133–159 mg m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup>. Sedimentin yläpuolisessa vedessä vallitsi mittaushetkellä lähes hapettomat olosuhteet. Tämä on voinut vaikuttaa hapenkulutusta laskevasti.

Mallissa käytettävä sedimentin hapenkulutus arvioitiin ensisijassa kesällä 1995 tehtyjen mittausten perusteella. Hapenkulutuksen lukuarvot ilmoitettiin muiden laskentakertoimien tapaan 15 °C:een lämpötilalle. Kun sedimentin hapenkulutuksen lämpötilariippuvuus ( $a + b \times T$ ) oli jyrkimmillään (0 °C:ssa), niin

lämpötilariippuvuuskerroin  $a$  oli  $1,125^{1/^\circ\text{C}}$ . Optimilämpötila oli  $46,3^\circ\text{C}$  (taulukko 25, luvussa 3.4.2). Sedimentin aiheuttaman hapenkulutuksen arvona ( $15^\circ\text{C}$ ) käytettiin yli 10 m:n syvyydessä  $200\text{--}1600\text{ mg m}^{-2}\text{ vrk}^{-1}$  (tarkemmin taulukossa 25). Kun veden lämpötila alimmissa vesikerroksissa oli valtaosan vuodesta  $2\text{--}4^\circ\text{C}$ , jäi laskentaan käytännössä vaikuttamaan huomattavasti alhaisempi hapenkulutus, esim.  $4^\circ\text{C}$ :ssa vain  $70\text{--}560\text{ mg m}^{-2}\text{ vrk}^{-1}$ .

### 2.7.6 Biomassan hajoamisen aiheuttama (sekundäärinen) hapenkulutus

Lahdella kasvaneen tai sinne kulkeutuneen leväbiomassan hajoaminen kuluttaa vedestä happea ns. toisen vaiheen hapenkulutuksena. Suuruusluokkien hahmottamiseksi on alueelta käytössä perustuotannon ( $PT$ ,  $\text{g m}^{-2}$ ) ja klorofylli  $a$ :n ( $Chl-a$ ,  $\mu\text{g l}^{-1}$ ) mittaustuloksia vuodenajoittain (Tallberg ja Heiskanen 1999). Leväbiomassan, klorofylli  $a$ :n, perustuotannon ja hapenkulutusvaikutuksen ( $BOD$ ,  $\text{mg l}^{-1}$ ) likimääräsuhteita tuottavan kerroksen paksuuteen ( $K$ ,  $m$ ) jaettuina ovat esittäneet esim. Kauranne (1983) ja Granberg (1996) seuraavasti:

$$BOD = 3,14 \times PT \times K^{-1}$$

$$BOD = 1,5 \times BOD_7$$

Perustuotannon mittausjakson pituudella ( $Dt$ ,  $\text{vrk}$ ) jakamalla saadaan näistä toissijaisen  $BOD_7$ :n lisäykselle  $dBOD_7/dt$  ( $\text{mg l}^{-1}\text{ vrk}^{-1}$ )

$$dBOD_7/dt = 3,14 \times PT \times K^{-1} \times Dt^{-1} \times (1,5)^{-1}$$

Toisaalta, jos leväbiomassan ja sen aiheuttaman hapenkulutuksen likiarvoina käytetään riippuvuuksia:

$$\text{leväbiomassa} = 100 \times \text{klorofylli } a$$

$$\text{leväbiomassan } BOD = 1,5 \times \text{leväbiomassa}$$

saadaan vähenemistahdilla ( $\rho$ ,  $\text{vrk}^{-1}$ ) kerrottuna toissijaisen  $BOD_7$ :n lisäykseksi  $dBOD_7/dt$  ( $\text{mg l}^{-1}\text{ vrk}^{-1}$ ) vastaavasti

$$dBOD_7/dt = \rho \times Chl-a \times 0,01$$

Näiden soveltaminen kesän 1992 Sällvikin mittaustuloksiin (Tallberg ja Heiskanen 1999) käyttäen vajoavan orgaanisen hiilen hajoamiskertoimen karkeana likiarvona kesäisin  $0,1\text{ vrk}^{-1}$  ja keväisin ja syksyisin  $0,05\text{ vrk}^{-1}$  (Heiskanen ja Lepänen 1995) johtaa taulukossa 10 esitettyihin sekundääriseen  $BOD$ -kuorman tasoihin.

Taulukko 10. Perustuotannon ja klorofylli  $a$ :n mittaustuloksista (Tallberg ja Heiskanen 1999) vuoden 1992 kevät-, kesä- ja syyskausille lasketut biomassan hajoamisesta johtuvat (sekundääriset) seitsemän vuorokauden hapenkulutustlisäykset  $BOD_7$ .

Ajanjakso	PT ( $\text{gC m}^{-2}$ )	$dBOD_7/dt$ ( $\text{g m}^{-3}\text{ vrk}^{-1}$ )	Chl-a ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )	$dBOD_7/dt$ ( $\text{g m}^{-3}\text{ vrk}^{-1}$ )
2.4. - 11.6. (70 vrk)	8	0,04	7	0,04
12.6. - 3.9. (80 vrk)	13	0,06	6	0,06
4.9. - 25.11. (80 vrk)	11	0,05	10	0,05

Pohjanpitäjänlahden 0,1 km<sup>3</sup>:n tai koko laskenta-alueen 0,14 km<sup>3</sup>:n tuottaviin kerroksiin ulotettuina saataisiin näin laskettuna (0,05 g m<sup>-3</sup> vrk<sup>-1</sup>:n kulutuslisäyksillä) tuottavaan kerrokseen jaettaviksi BOD<sub>7</sub>:n lisäkuormituksiksi 5000 ja 7000 kg vrk<sup>-1</sup>. Merialueen pistekuormituksiin verrattuina nämä ovat 200-kertaisia.

Käytännössä esim. levien kasvuun liittyvä hapen tuotto vaimentaa edellä esitettyjä kulutuksia. Tällä perusteella mallissa käytettäväksi sekundäärisen hapenkulutuksen nettovaikutukseksi (levien mikrobiologisesta hajoamisesta johtuvan hapen kulutuksen ja perustuotannon happituotannon erotus) on syötetty enimmillään 1900 kg vrk<sup>-1</sup>. Pinnan lähellä 0–3 m:ssä levistä johtuva hapenkulutus ja hapentuotto on oletettu tasapainoon keskenään. Koko nettovaikutus on jaettu 3–10 metrin välisiin kerroksiin kunkin pohjan tason ja 3 m:n välisten tilavuuksien suhteissa. Tämä johtaa syvyysvyöhykkeittäin enimmillään seuraavalaisiin nettovaikutuksiin: 3–6 m 44,7 mg m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup> ja 6–10 m 67,4 mg m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup>.

Sekundäärisen hapenkulutuksen syöttö oli lähellä huippuarvoaan 1,6–1,9 tn vrk<sup>-1</sup> kesä-elokuun välisenä aikana 1996 ja kesäkuussa 1995. Muulloin kasvukaudella se oli 0,1–1,3 tn vrk<sup>-1</sup>. Kesän 1996 korkeisiin lukemiin ovat pääsyyinä kevään klorofyllihuiput (enimmillään 60 µg l<sup>-1</sup>). Kesän 1995 huiput jäivät näistä alle kolmasosaan ja esiintyvät selvästi myöhemmin. Kevään 1996 klorofyllipitoisuudet ovat korkeita myös muihin 1990-luvun tuloksiin verrattuna (taulukko 11). Kaikkina vuosina tulokset eivät kuitenkaan kuvaa kevätkukintaa. Mm. vuonna 1995 kukinta oli jo ohi näytteenoton alkaessa.

Taulukko 11. Kesien 1990–96 kevät-, kesä- ja syyskausien (80 vrk) klorofylli a:n likimääräiset mittauskeskiarvot ja niiden hajoamisesta aiheutuviksi johdetut likimääräiset seitsemän vuorokauden hapenkulutuskertoimet dBOD<sub>7</sub>/dt.

Vuosi	Chl-a (mg l <sup>-1</sup> )			dBOD <sub>7</sub> /dt (g m <sup>-3</sup> vrk <sup>-1</sup> )		
	Kevät	Kesä	Syysy	Kevät	Kesä	Syysy
1990	10	4	5	0,05	0,04	0,03
1991	5	5	10	0,03	0,05	0,05
1992	7	6	10	0,04	0,06	0,05
1993	13	15	5	0,07	0,15	0,03
1994	9	8	4	0,05	0,08	0,02
1995	7	8	12	0,04	0,08	0,06
1996	24	9	11	0,12	0,09	0,06

## 2.7.7 Vajoaminen, pohjalle kertyminen ja pohjalta vapautuminen

### Vajoamisnopeudet

Kiintoaineen (Total Particulate Matter) on Pohjanpitäjänlahdella mitattu vajoavan keskimäärin 7,5 g m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup>, josta hiiltä on ollut noin 6 %, ts. 450 mg m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup> (Heiskanen 1998, Heiskanen ja Tallberg 1999). Klorofylli a:n pitoisuuksista 6–10 µg l<sup>-1</sup>, saadaan biomassaksi likimain 0,6–1 mg l<sup>-1</sup> ja hiilen pitoisuuksien suuruusluokaksi likimain 300–500 mg m<sup>-3</sup>. Näistä pääteltynä vajoaminen olisi ollut melkoisen nopeaa: 0,9–1,5 m vrk<sup>-1</sup>. Heiskanen ja Tallberg (1999) ovat mittaustuloksista päätyneet vajoamisnopeuksiin 1,5–2,6 m vrk<sup>-1</sup>. Osittain kiintoainepartikkeleissa olevan, osittain veteen suspendoituneen orgaanisen aineen mikrobiologisesta hajoamisesta johtuva biologinen hapenkulutus oli mallissa pitoisuusmuuttujana, jonka oletettiin vajoavan vain vähän kiintoainetta hitaammin. Vajoamisnopeutena käytettiin 0,86 m vrk<sup>-1</sup>.



Suolapitoisuudelle on aiemmissa sovelluksissa käytetty useimmiten näennäistä vajoamisnopeutta 5 cm vrk<sup>-1</sup>. Näistä poiketen tuettiin mallissa aiempia sovelluksia jyrkemmän kerrostumisen säilymistä 2,4-kertaisella vajoamisella 12 cm vrk<sup>-1</sup>.

Kuormitusten ja vajoamisnopeuksien edellä esiteltyt lukuarvot eivät nojautu mittaustuloksiin kovin täsmällisesti. Silti niissä on yksilöity jotain yhteyksiä havaintoihin ja yksiselitteisiksi muotoiltuihin riippuvuuslausekkeisiin. Näiden nojalla valintojen asianmukaisuutta voidaan laskentatuloksista riippumattakin arvioida, tarkentaa ja korjata uusien mittaustulosten pohjalta.

### Sedimentaationopeudet

Vajoamisnopeuksista poiketen syötettiin sekä BOD:n että suolapitoisuuden pidätyksiksi pohjalle eli sedimentaationopeuksiksi kaikille syvyyksille 0 m vrk<sup>-1</sup>, jolloin pohjalle kertyminen ei vähentänyt ainemääriä vedestä. Kertymättömyyttä ylimmille vyöhykkeille voidaan selittää myös aallokon vaikutuksena. Syvemmällä taas kertymisen merkitys on vähäinen, koska sinne ehdittyään BOD on ehtinyt jo paljolti kulua. Suolaisuuden osalta kertymättömyys tarkoittaa sitoutumisen ja liukenemisen tasapainoa.

BOD:n sedimentaationopeuden määrittäminen vajoamisnopeutta 0,86 m vrk<sup>-1</sup> pienemmäksi osaltaan kumoaa tai vaimentaa laskentamenetelmästä johtuvaa pysytysuunnan numeerista sekoittumista. Toisaalta sen voi tulkita tarkoittavan epäsuorasti esitettyä (implisiittistä) sisäkuormaa. Pohjan läheisillä BOD<sub>7</sub>-arvoilla 0,5 mg l<sup>-1</sup> se on suuruusluokkaa 0,43 g m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup>, ts. koko alueelle ulotettuna noin 16,5 tn vrk<sup>-1</sup>. Ilman lisätarkasteluja ei käy ilmi, mikä osa on todellista kuormituslisää.

### Pohjalta vapautuva sisäinen kuormitus

Pohjalta varsinaisesti vapautuvasta sisäisestä kuormituksesta tai sen aika-, paikka- ja syvyysvaihteluista ei välittömiä mittaustuloksia ollut tiedossa. Sedimentin hapenkulutusmittausten yhteydessä havaittu runsas kaasun vapautuminen viittasi kuitenkin siihen, että pohjalta saattaa vapautua runsaastikin happea kuluttavaa ainesta. Tämä hapenkulutuksen arvioitiin olevan samaa suuruusluokkaa kuin varsinaisen sedimentin hapenkulutuksen. Sen arvona käytettiin Tammisaaren edustan yli 3 metrin syvyyksille tasaisesti kautta vuoden 666 kg vrk<sup>-1</sup>. Pohjanpitäjänlahden sedimentin hapenkulutus esitettiin suuremman merkityksensä vuoksi vuodenajoista riippuvana. Se oli yli 12 metrin syvyyksille enimmillään 1800 kg vrk<sup>-1</sup>. Levien hajoamisen aiheuttamien hapenkulutusten tapaan nämäkin lisäkuormitukset jaettiin rajapinnan ja pohjan tason välisten tilavuuksien suhteissa tasan kunkin syvyysvyöhykkeen pohjan aloille (taulukko 12).

Taulukossa 12 esitettyjä Pohjanpitäjänlahden pohjalta vapautuvan BOD<sub>7</sub>:n enimmäisarvoja käytettiin elo-syyskuussa 1995 ja syyskuussa 1996. Kesä-heinäkuussa käytettiin enimmäisarvoista noin 75 %, huhti-, touko- ja lokakuussa 25 %. Marraskuusta maaliskuulle pohjalta ei oletettu vapautuvan happea kuluttavaa kuormitusta. Pohjalta vapautumaan syötetyt BOD<sub>7</sub>-kuormitukset olivat samaa luokkaa levien hajoamisen vaikutusten kanssa ja noin puolet valumavesien kuormituksesta. Taulukossa 25 on esitetty Pohjanpitäjänlahden osalta yli 12 m syvyysvyöhykkeestä vapautuvan BOD<sub>7</sub>:n kokonaismääränä käytetyt kuukausittaiset arvot.

Taulukko 12. Tammisaaren edustan ja Pohjanpitäjänlahden pohjilta vapautumaan syötetyt BOD<sub>7</sub>:n kuormitukset ja niitä vastaavat kuormitusvuot. Tammisaaren edustan arvot ovat koko vuotta koskevia ja Pohjanpitäjänlahden arvot enimmäisarvoja.

Tammisaaren edusta, hilaruudut (1,1–20,35)				
Pohjakeros (m) - (m)	Yläp.tilavuus (km <sup>3</sup> )	Kuormitus (kg vrk <sup>-1</sup> )	Pinta-ala (km <sup>2</sup> )	Vuo (mg m <sup>-2</sup> vrk <sup>-1</sup> )
3 - 6	0,008848	263	3,52	74
6 - 10	0,002984	241	0,96	250
10 - 12	0,000540	71	0,16	440
12 - 15	0,000280	65	0,12	540
15 - 20	0,000012	26	0,04	650

Pohjanpitäjänlahti, hilaruudut (15,36–50,66)				
Pohjakeros (m) - (m)	Yläp.tilavuus (km <sup>3</sup> )	Kuormitus (kg vrk <sup>-1</sup> )	Pinta-ala (km <sup>2</sup> )	Vuo (mg m <sup>-2</sup> vrk <sup>-1</sup> )
12 - 15	0,001	36	0,88	41
15 - 20	0,011	364	1,96	190
20 - 25	0,012	391	1,16	337
25 - 30	0,022	735	1,44	510
30 - 35	0,008	274	0,40	685

## 2.7.8 Kuluminen ja ilmastuminen

### BOD:n kulumisnopeus vedessä

Orgaanisen hiilen hajoamisesta Lohjanjärven, Mustionjoen ja merialueen vesissä oli työn loppuvaiheesta kohtalaisesti laboratoriomittauksia (Vuoriranta ja Saloniemä 1996, Vuoriranta 1997). Laboratoriokokeissa hajosi hiilestä ensimmäisen viikon aikana vuorokaudessa noin 1–30 %, keskimäärin kokeen aikana 5–10 %. Hajoamistahti oli siis noin 0,01–0,3 vrk<sup>-1</sup>.

Lähinnä kiintoaineen mittaustulosten pohjalta nopeanpuoleiseksi valittu BOD:n vajoamisnopeus 0,86 m vrk<sup>-1</sup> oli omiaan jakamaan hapen kulumista melko laajalti kaikkiin vesikerroksiin. BOD<sub>7</sub>:n hajoamistahdiksi valittiin sen mukaisesti mittaustulosten keskivaiheilta 0,09 vrk<sup>-1</sup>.

Epäsuorasti päätettyjen kuormitusten jakaminen edellä esitystä eroavalla tavalla levätuotannosta johtuvan sekundaärikuormituksen ja pohjalta vapautuvan sisäkuormituksen kesken voisi vaatia tarkistuksia myös vajoamis- ja hajoamisnopeuksiin. Samoin pohjakertymien hapenkulutuksen osoittautuminen tähän mennessä tietoon saaduista mittaustuloksista poikkeavaksi johtaisi niin ikään vastaaviin tarkistuksiin.

### Ilmastuminen

Hapen siirtymistä ilmasta veden pintakerrokseen on selvitetty hyvinkin yksityiskohtaisin kokein ja mittauksin sekä käytetty happimalleissa niiden alusta alkaen. Suomen 3D-laskelmissa on nykyisin vakiintunut käytäntö, jossa ilmastuminen kiihtyy verrannollisena tuulen nopeuden neliöjuureen. Viime aikoina riippuvuutta on useimmiten kevennetty siten, ettei tyynen sään ilmastumista ole otettu huomioon – jolloin jääpeitteen vaikutus hapenvaihtoon on samalla tullut kuvatuksi.



Ilmastumiskertoimeksi valittiin jyrkkyyden ylärajoilta  $2,3 \mu\text{m vrk}^{-1}$ . Ilmastumisnopeudet, jotka saadaan tuulen nopeuden perusteella, on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13. Ilmastumisnopeus tuulen nopeuden funktiona.

Tuulen nopeus ( $\text{m s}^{-1}$ )	Ilmastumisnopeus ( $\text{m vrk}^{-1}$ )
0	0,00
1	0,45
4	0,89
9	1,34

## Tulokset

### 3.1 Vedenlaatu tutkimusalueella

#### 3.1.1 Alusveden happitila ja kerrostuminen vuosina 1995 ja 1996

Vuosina 1995 ja 1996 tehtyjen CTD-luotausten ja vesinäytteistä määritetyn suolaisuuden, lämpötilan ja happipitoisuuden perusteella piirrettiin suolaisuuden, lämpötilan, tiheyden ja happipitoisuuden tasa-arvokäyrät Sällvikin syvänteessä ajan suhteen (kuva 12) sekä hetkelliset tasa-arvokäyrät (kuvat 13–18) Pohjanpittäjänlahden näytteenotto-luotauslinjalta (vrt. kuviin 6 ja 7). Näin saatiin havainnollinen kuva alusveden happitilan ja kerrostuneisuuden kehittymisestä.

##### Talvi ja kevät 1995

Kevät oli aikainen ja virtaama valuma-alueelta alkoi nousta jo maaliskuun alussa. Juoksutus Mustionjoesta jatkui suurena kesäkuuhun asti. Merenpinnan korkeus pysyi ylhäällä huhtikuuhun asti. Pintaveden suolaisuus oli valumavesien vuoksi alhainen. Syvänteen alusveden suolaisuus pysyi talven aikana 4,5:ssa g kg<sup>-1</sup> ja lämpötila 3–4 °C vaiheilla. Happipitoisuus oli parhaimmillaan noin 7 mg l<sup>-1</sup>, josta se laski jonkin verran talven kuluessa. Huhtikuussa juoksutus pieneni väliaikaisesti, ja huhtikuun alun ja toukokuun puolenvälin havaintokertojen välisenä aikana syvänteen happitilanne parani hieman.

##### Kesä 1995

Kesällä valunta ja juoksutukset olivat pieniä. Kesä-heinäkuussa vedenkorkeus oli lähellä keskiarvoa. Koko kesän syvänteen alusveden happipitoisuus laski tasaisesti. Lämpötila nousi kahdeksaan asteeseen. Loppukesällä syvänteen alus- ja päällysveden suolaisuus- ja tiheysgradientit voimistuivat pintaveden lämmitessä.

##### Syksy ja alkutalvi 1995

Juoksutukset ja valunta olivat melko pieniä marraskuun loppupuolelle asti. Marraskuun lopussa valuma-alueelta tuleva virtaama nousi noin 50:een m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, mutta laski joulukuun puolivälissä noin 20:een m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Vedenkorkeus nousi syys-lokakuun vaihteessa ja marraskuun alussa.

Lokakuun puolenvälin (19.10.) ADCP-virtausmittauksessa Tammisaaren salmissa havaittiin hetkellisesti hyvin voimakas suolaisen meriveden sisäänvirtaus (50 cm s<sup>-1</sup> ~ 350 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, suolaisuus koko vertikaalissa 4,3 g kg<sup>-1</sup>). Samanaikaisesti myös merivesi oli korkealla. Aanderaa-virtausmittauksissa (mittaus alkoi 25.10.1995) havaittiin 25.10.–30.12.1995 välisenä aikana Tammisaaren edustan pohjan läheisessä vesikerroksessa jatkuvaa meriveden sisäänvirtausta, jonka tiheys oli selvästi syvänteen alusveden tiheyttä korkeampi. Merivettä virtasi Tammisaaren salmissa pohjan läheistä kerrosta pitkin kohden syvänteen alusvettä keskimäärin 5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

Alkusyksystä suolainen merivesi oli selvästi Tammisaaren eteläpuolella, mutta siirtyi syys-lokakuun vaihteessa Tammisaaren pohjoispuolelle. Lokakuun alussa harppauskerros loiveni ja siirtyi alemmas pintaveden viilenemisen myötä. Lokakuun puolivälin jälkeen happipitoisuus nousi nopeasti 2:sta mg l<sup>-1</sup> 7:ään mg l<sup>-1</sup>.

#### **Talvi 1996 ja kevät 1996**

Talvella 1996 valunta ja juoksutukset pysyivät pieninä huhtikuun puoliväliin asti. Vedenkorkeus oli alhainen, mutta nousi huhti-toukokuussa. Tammisaaren salmien pohjan läheisessä kerroksessa mitattiin syvänteen alusvettä tiheämmän veden virtausta syvännettä kohden (noin 6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Vuoden vaihteessa koko vesipatsaan lämpötila laski kahteen asteeseen. Suolainen merivesi ulottui talvella Tammisaaren pohjoispuolelle, syvänteen eteläpäähän. Lahtialueen alusveden happipitoisuus pysyi korkealla (8–9 mg l<sup>-1</sup>) koko talven. Alkuvuodesta 1996 harppauskerros oli hyvin lähellä pintaa, mutta siirtyi keväällä jäiden lähdettyä alemmas.

#### **Kesä 1996**

Kesä-heinäkuussa valunta ja juoksutukset olivat korkealla. Merenpinta nousi yli keskiarvon kesä-heinäkuussa. Heinä-elokuussa Tammisaaren salmien pohjan läheisessä kerroksessa mitattu tiheys oli ajoittain hyvin lähellä syvänteen alusveden tiheyttä. On epävarmaa oliko tuolloin lahdelle virranneella vedellä vaikutusta alusveden happitilaan. Syvänteen päällysy- ja alusveden tiheyserot olivat melko suuria kevään ja alkukesän valuma-aluevirtaaman ja pintaveden lämpenemisen ansiosta. Kesällä suolainen merivesi oli Tammisaaren eteläpuolella. Happipitoisuus syvänteen eteläpäässä aleni tasaisesti koko kesän.

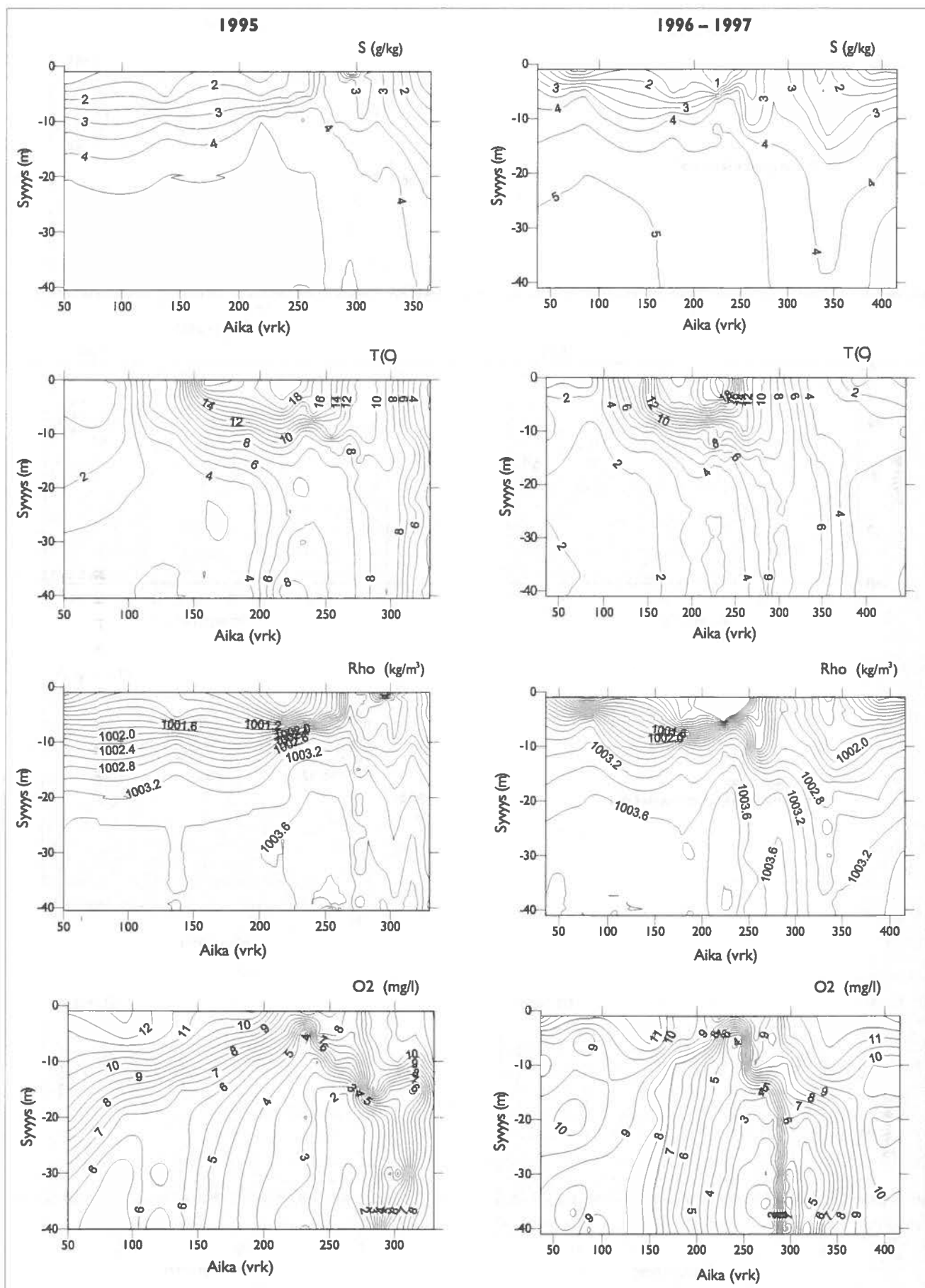
#### **Syksy-alkutalvi 1996**

Syyskuussa syvänteen happipitoisuus oli alimmillaan 2 mg l<sup>-1</sup>. Merivesi nousi sekä syys-lokakuun että loka-marraskuun vaihteissa. Alkusyksystä valunta ja juoksutukset olivat alhaisia, mutta nousivat voimakkaasti marraskuussa. Lokakuun 15.–25. välisenä aikana mitattiin 10 vuorokauden ajan Tammisaaren salmien pohjan läheisessä kerroksessa syvänteen alusvettä tiheämmän veden virtausta 6,7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> syvännettä kohden.

Lokakuussa näkyi selviä merkkejä meriveden sisäänvirtauksesta. Suolainen meriverivesi siirtyi syys-lokakuun vaihteessa Tammisaaren pohjoispuolelle lahden sisäosiin. Happipitoisuus ja suolaisuus nousivat syvänteen eteläpäässä. Myös päällyysvedessä suolaisuus nousi, ja päällyysveteen syntyi selvä lahden pituus-suuntainen suolagradienetti. Tiheyden vertikaalinen gradienetti puolestaan loiveni merkittävästi osittain myös pintaveden lämpenemisen vuoksi. Alusveden happipitoisuus nousi nopeasti 2:sta 5:een mg l<sup>-1</sup>. Lämpötila nousi syvänteessä 3:sta 7:ään asteeseen.

Marraskuussa valunta ja juoksutukset kasvoivat merkittävästi, ja meriveden sisäänvirtaus tyrehtyi. Suolaisen veden kiila siirtyi loka-marraskuun vaihteessa taas Tammisaaren eteläpuolelle. Alusveden happipitoisuus laski 6:sta 5:een mg l<sup>-1</sup>. Pintakerroksen suolaisuus ja tiheys laskivat nopeasti valuma-aluevirtaaman ansiosta. Myös alusvedessä suolaisuus ja tiheys laskivat hieman.

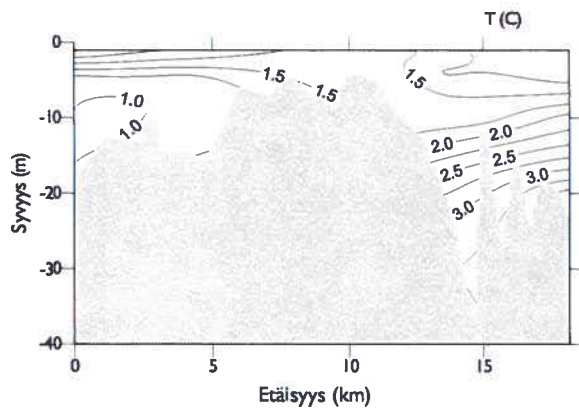
Joulukuussa syvänteen happitilanne parani selvästi. Samanaikaisesti suolaisuus nousi ja lämpötila laski.



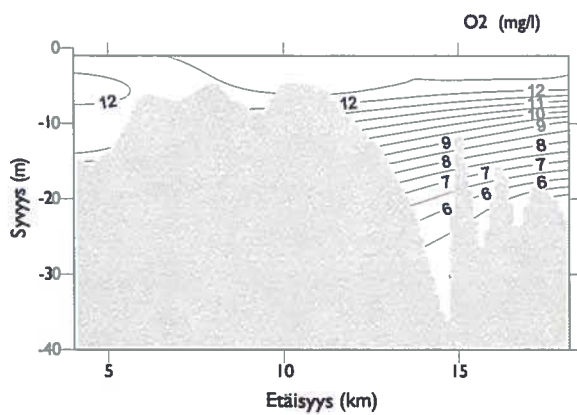
Kuva 12. Suolaisuuden, lämpötilan, tiheyden ja happipitoisuuden vaihtelu Pohjanpitäjänlahden syvänteessä (p 10) vuosina 1995 ja 1996-1997 (1.1.1996-15.2.1997).

5.4.1995

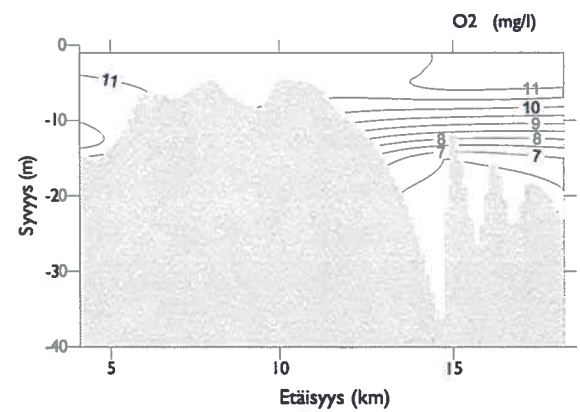
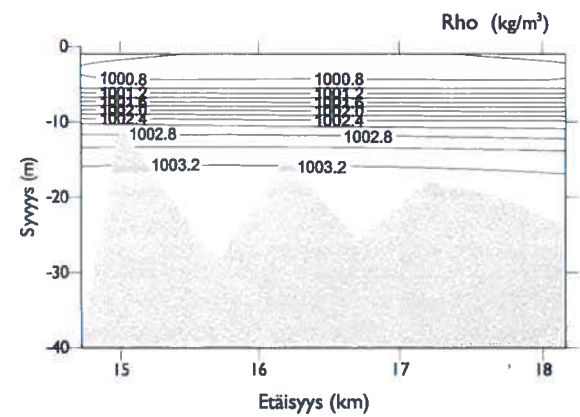
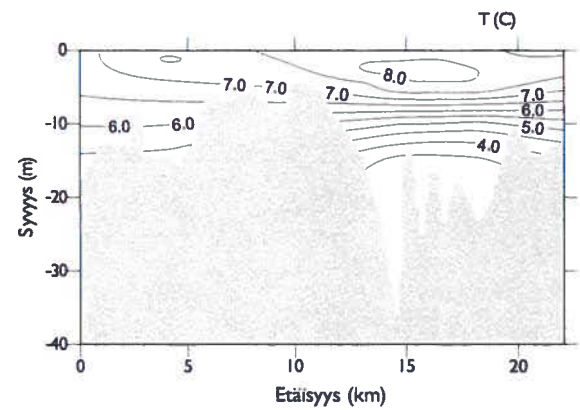
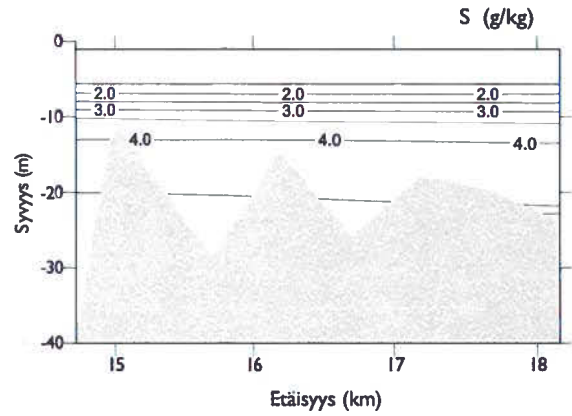
Ei suolaisuushavaintoja



Ei tiheystietoja  
suolaisuushavaintojen puuttuessa



18.5.1995



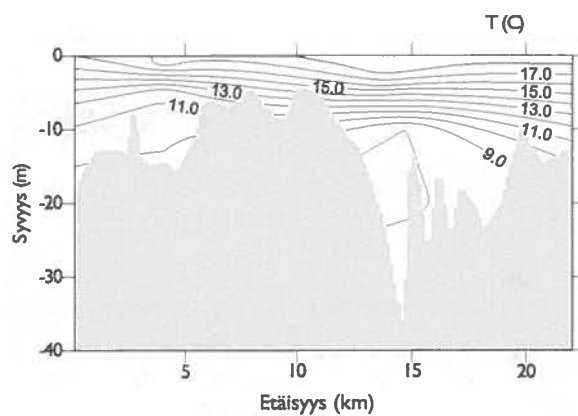
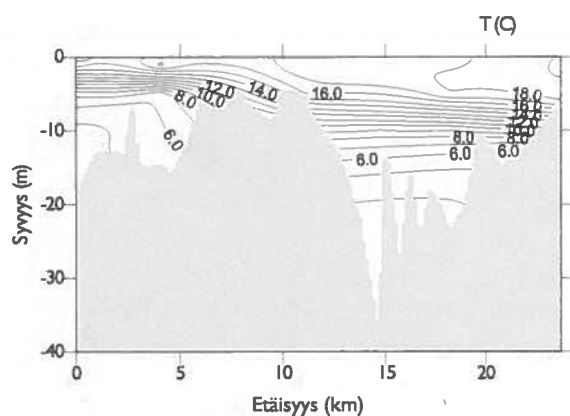
Kuva 13a. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 5.4. ja 18.5.1995. X-akselilla etäisyys pisteestä s11 (ks. kuva 7).

13.7.1995

22.8.1995

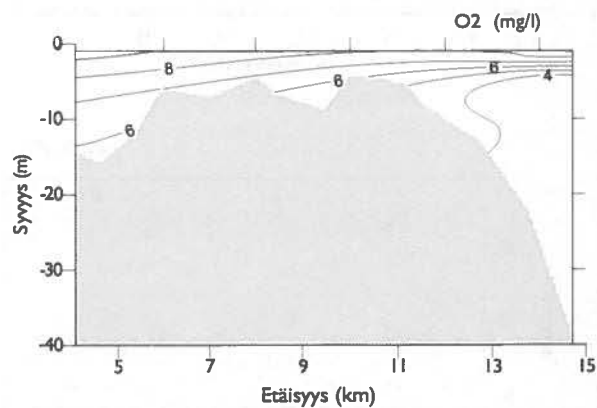
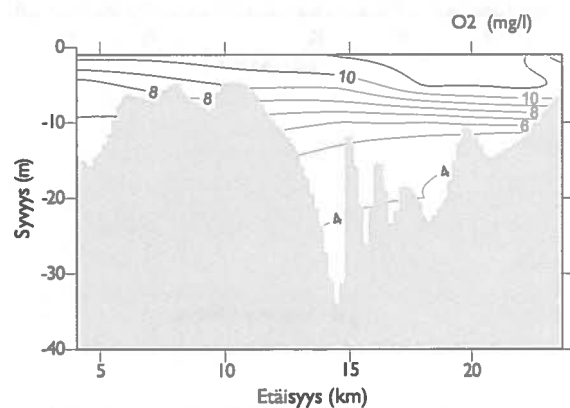
Ei suolaisuushavaintoja

Ei suolaisuushavaintoja



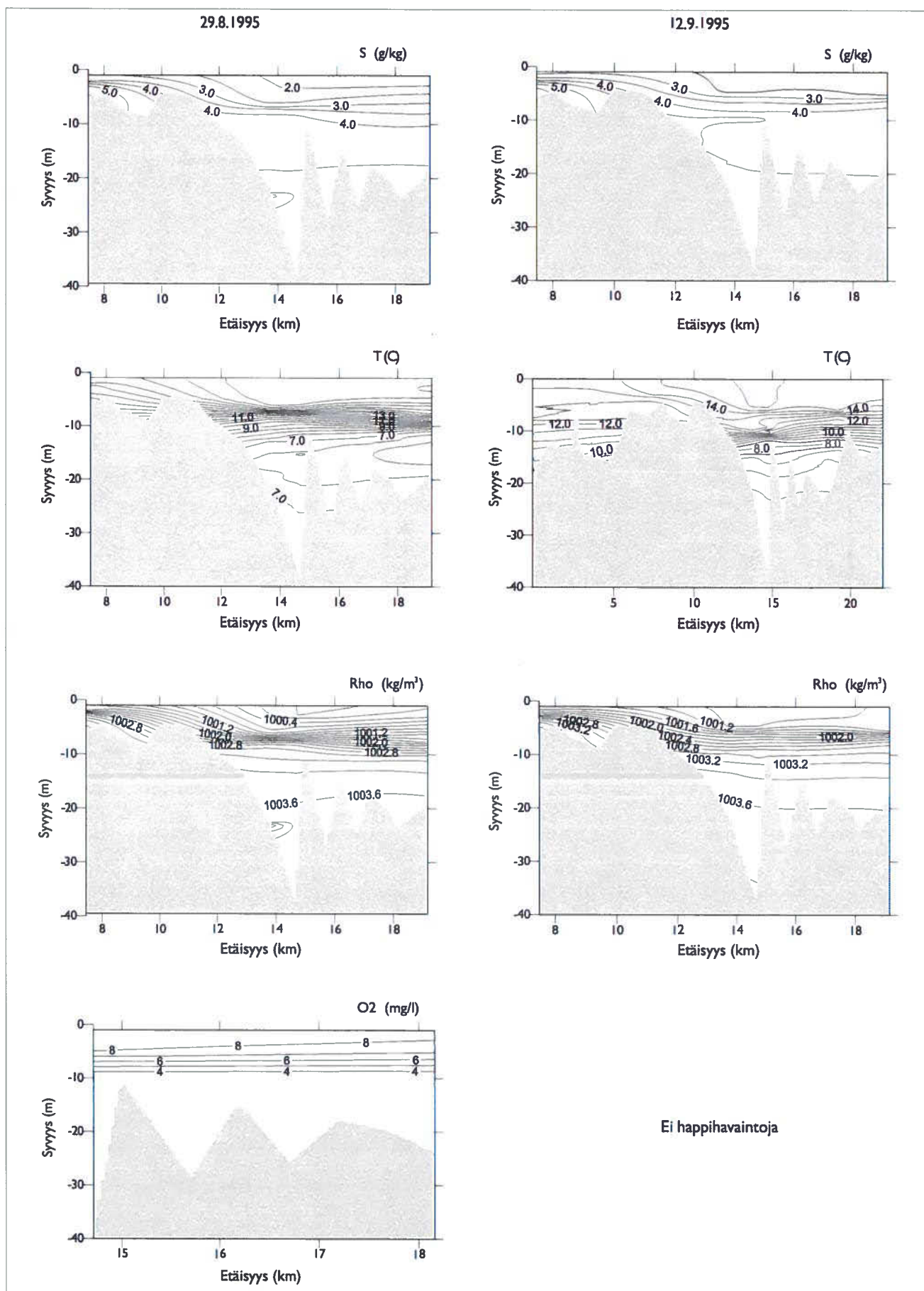
Ei tiheystietoja  
suolaisuushavaintojen puuttuessa

Ei tiheystietoja  
suolaisuushavaintojen puuttuessa

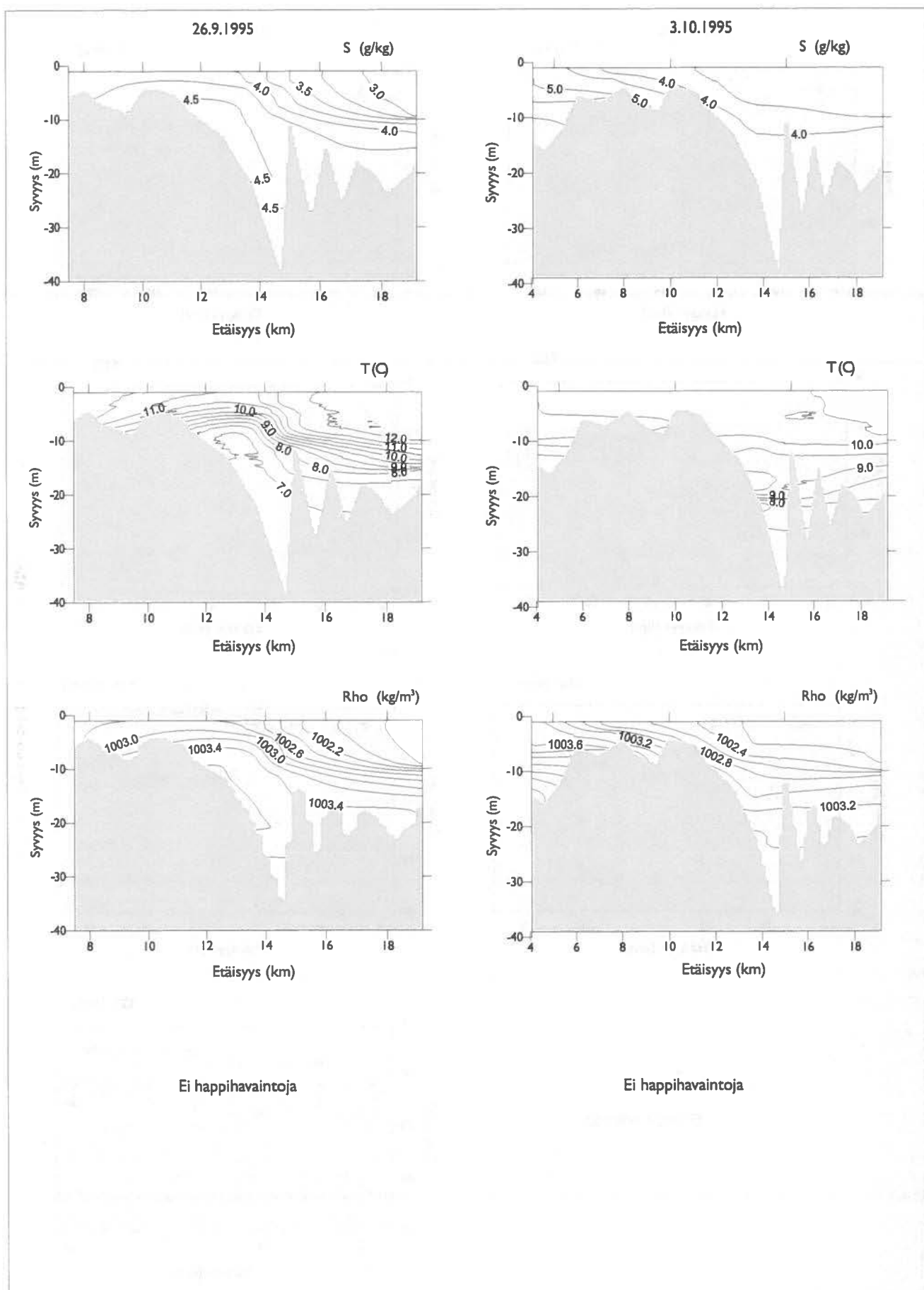


Kuva 13b. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 13.7. ja 22.8.1995. X-akselilla etäisyys pisteestä s11 (ks. kuva 7).

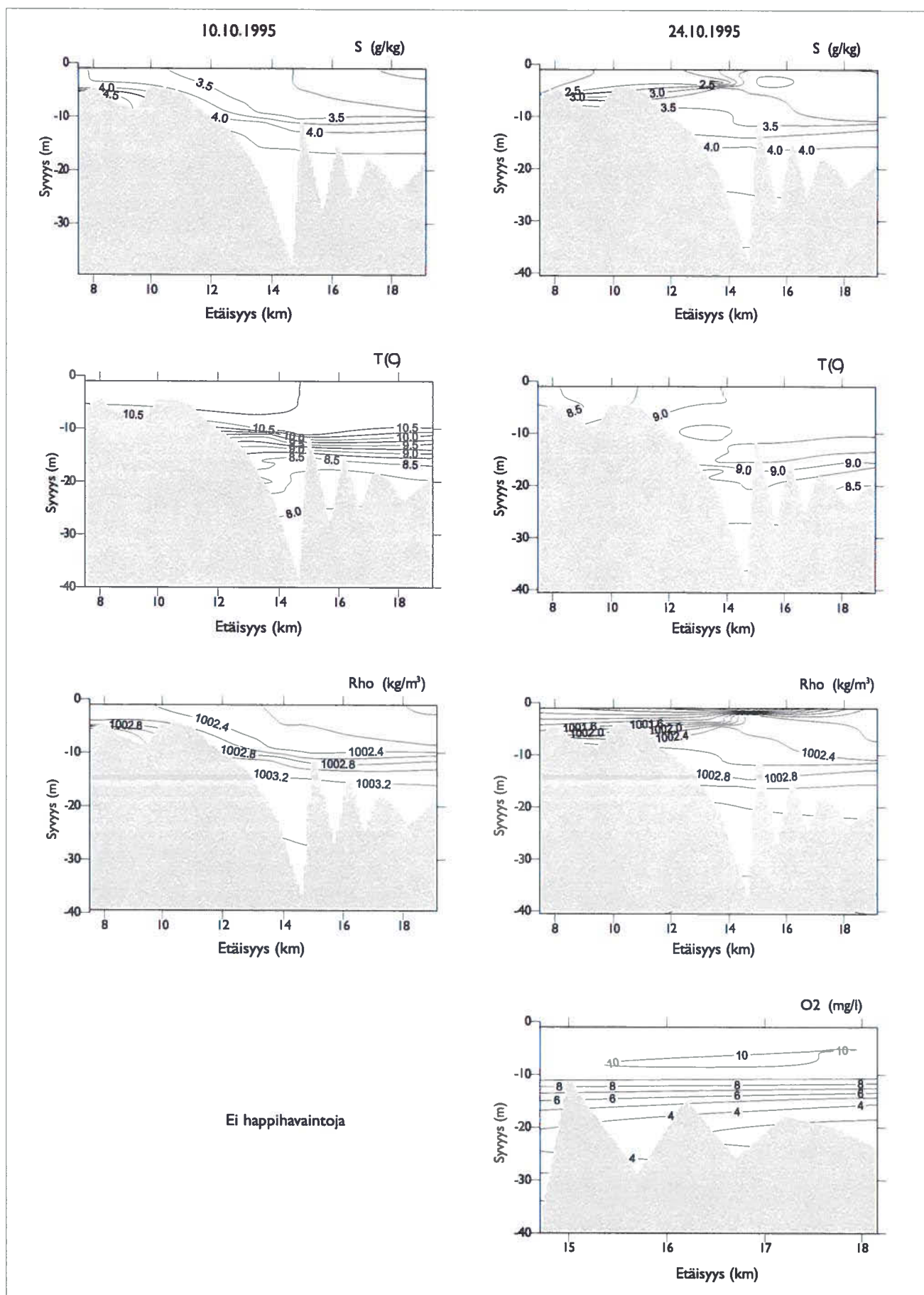




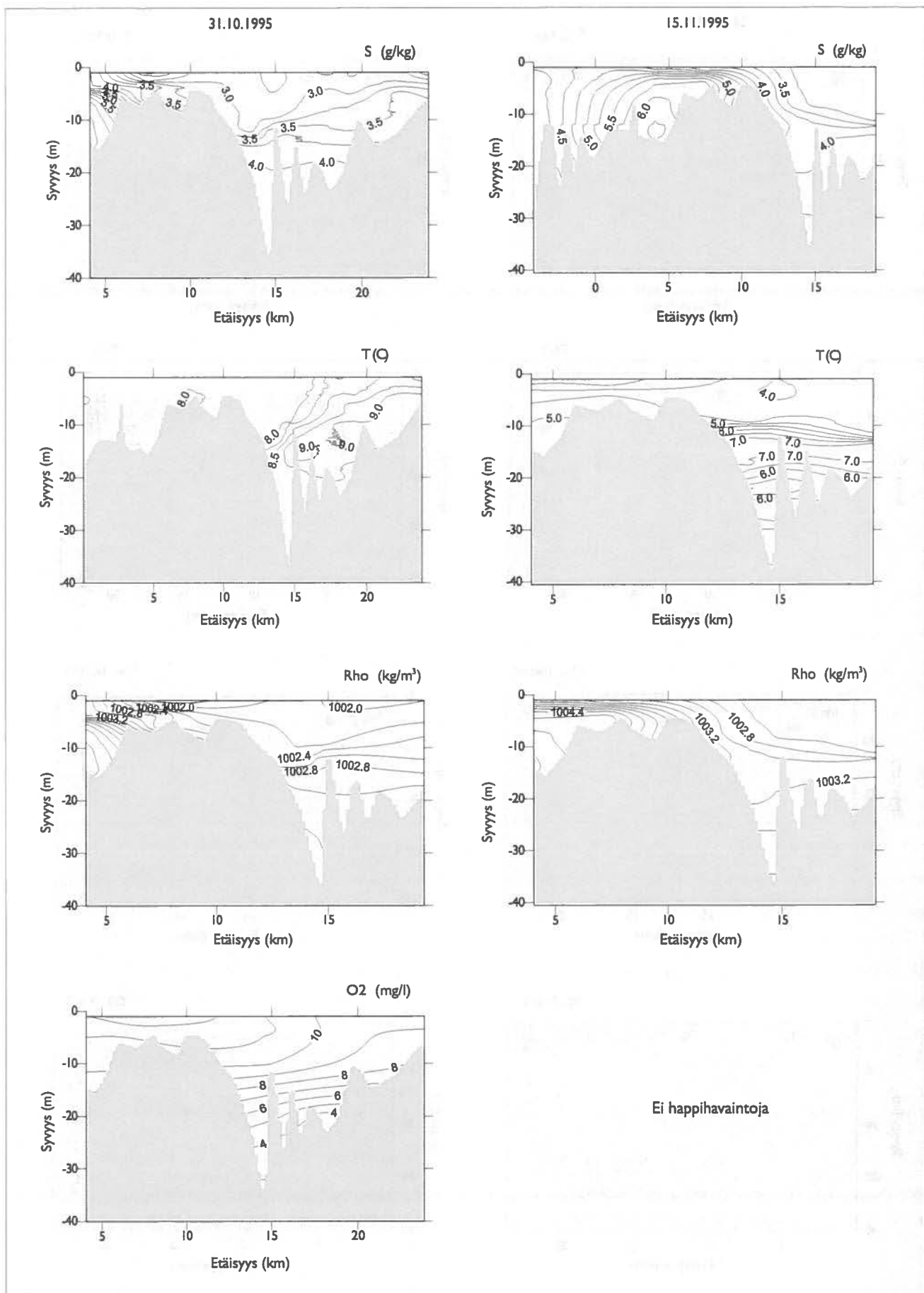
Kuva 14a. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 29.8. ja 12.9.1995. X-akselilla etäisyys pisteestä s11 (ks. kuva 7).



Kuva 14b. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 26.9. ja 3.10.1995. X-akselilla etäisyys pisteestä s11 (ks. kuva 7).

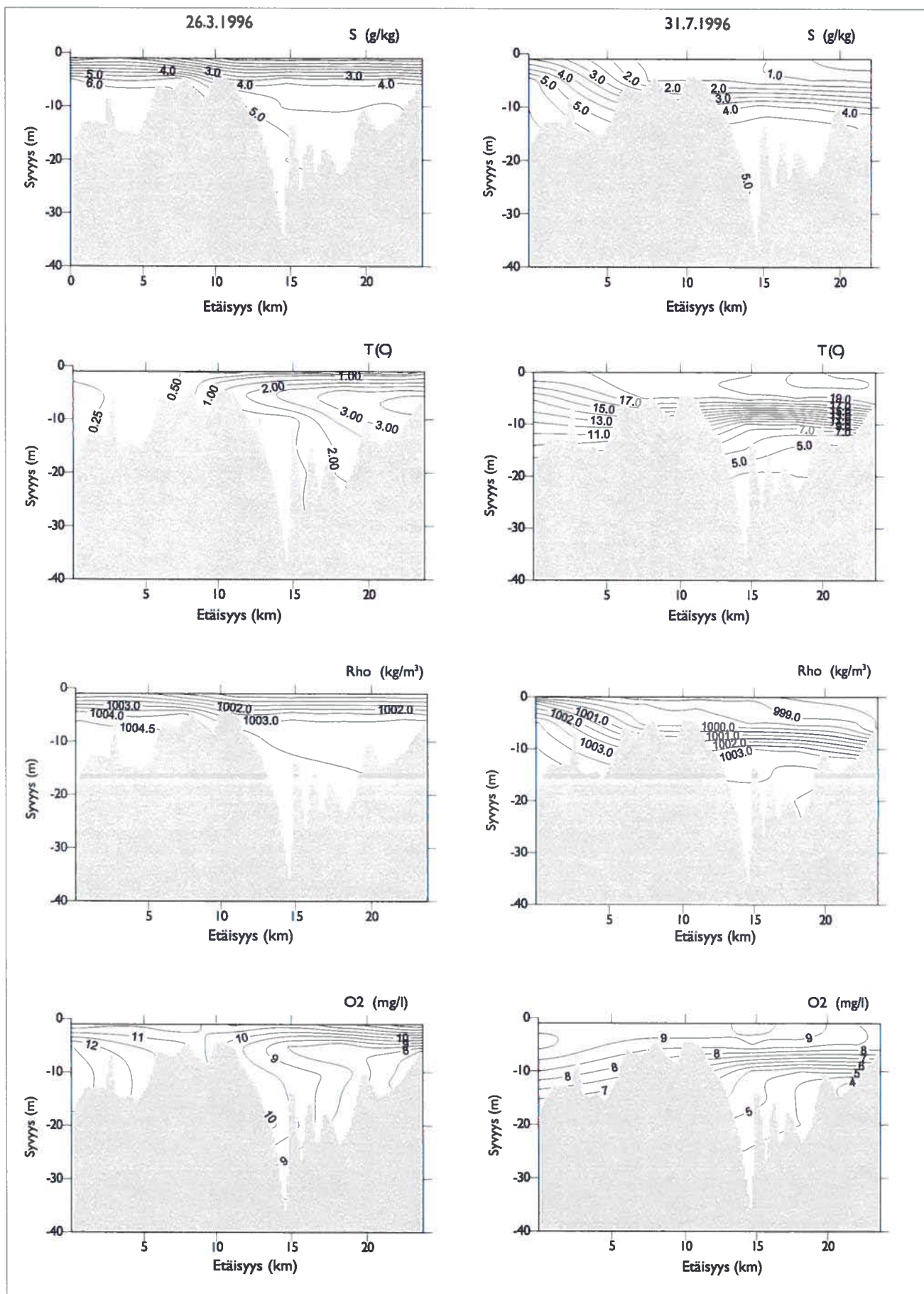


Kuva 15a. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 10.10. ja 24.10.1995. X-akselilla etäisyys pisteestä s I I (ks. kuva 7).

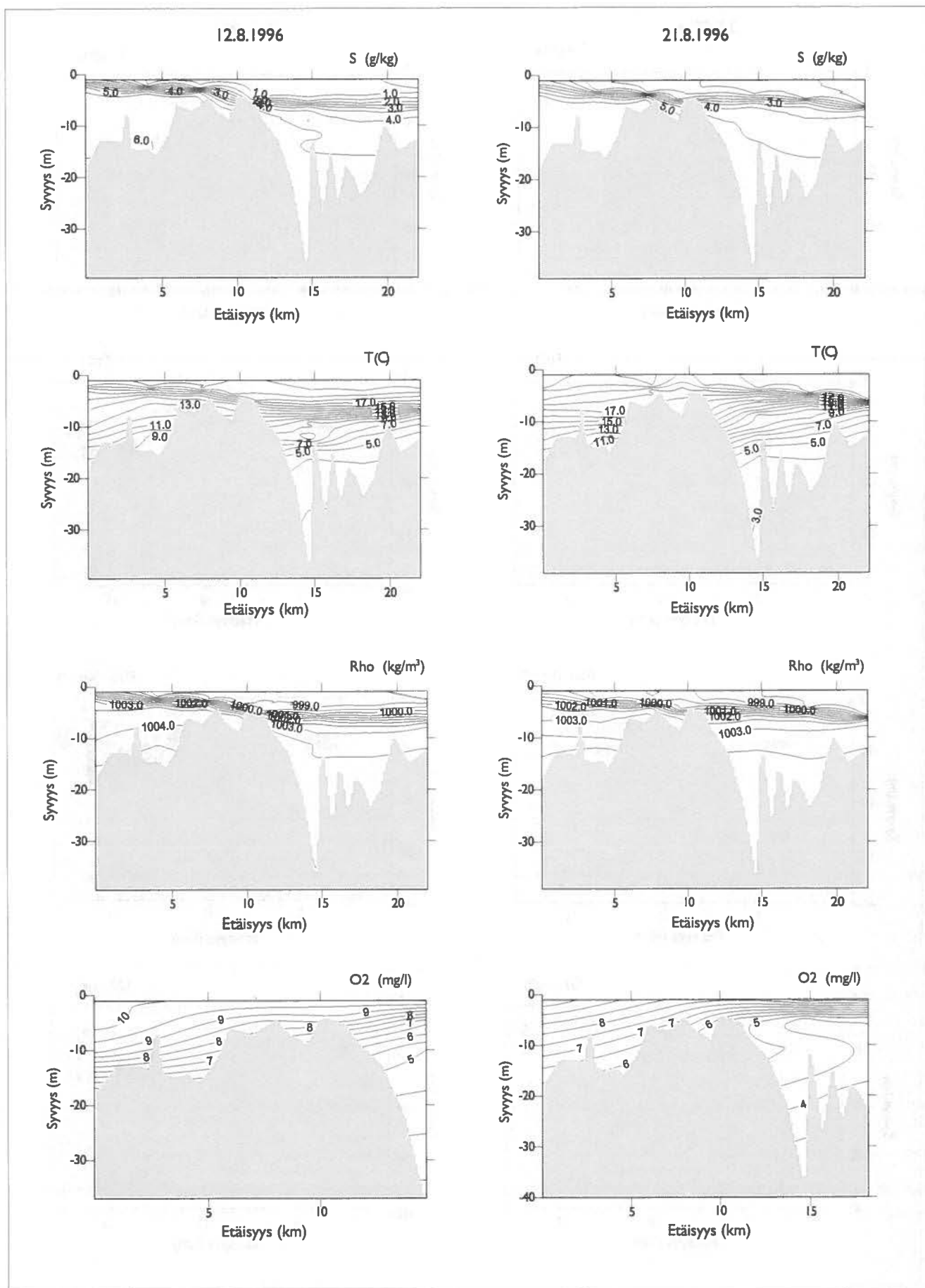


Kuva 15b. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 31.10. ja 15.11.1995. X-akselilla etäisyys pisteestä 111 (ks. kuva 7).



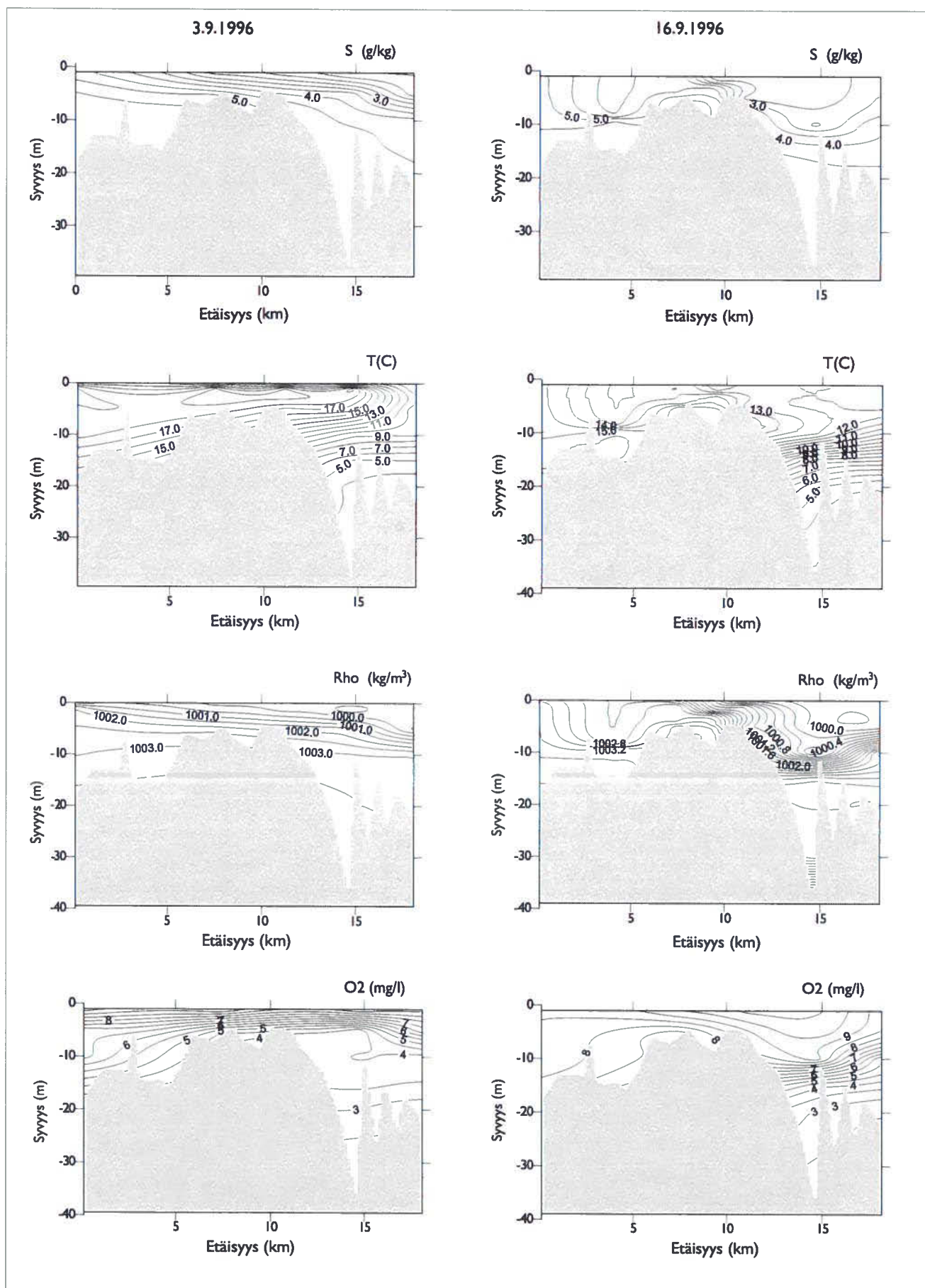


Kuva 16a. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 26.3. ja 31.7.1996. X-akselilla etäisyys pisteestä s I I (ks. kuva 7).

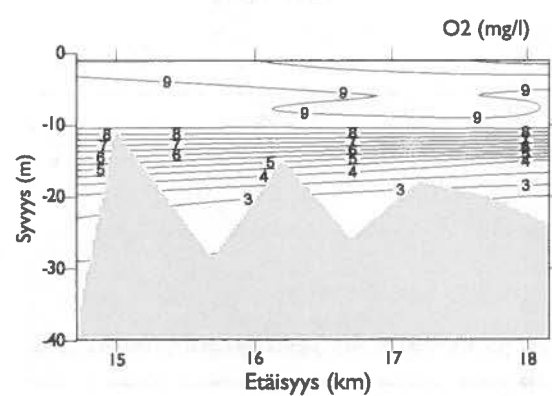
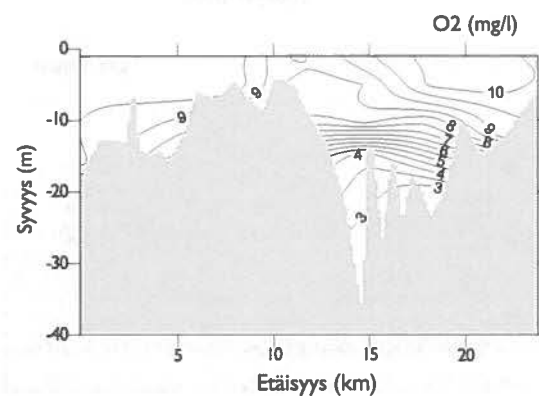
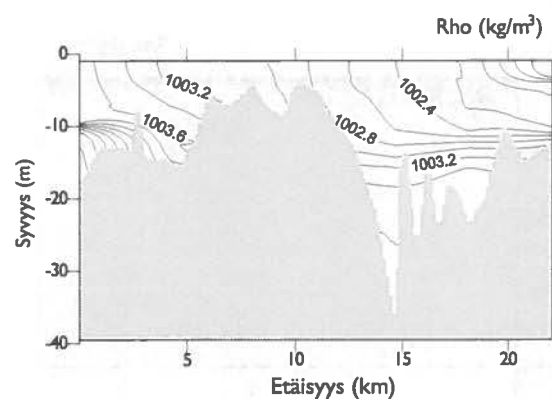
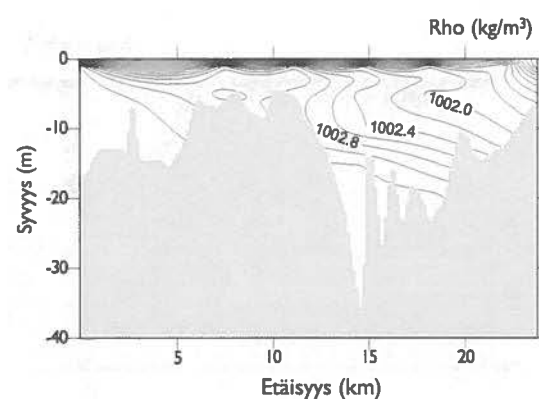
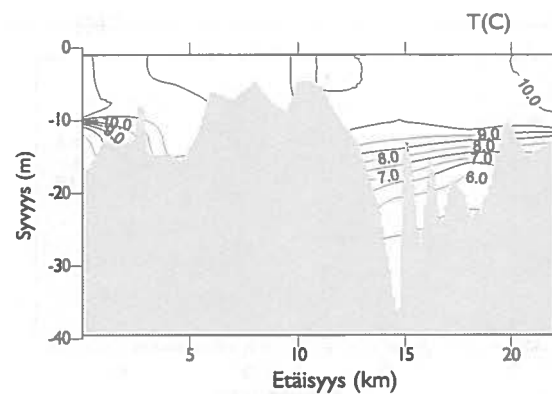
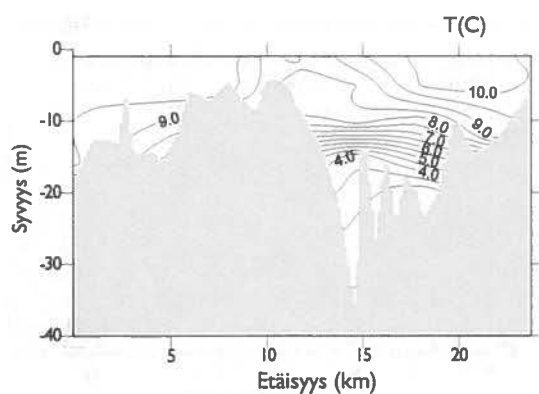
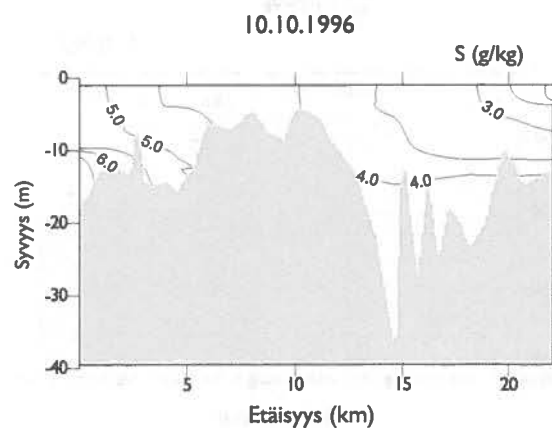
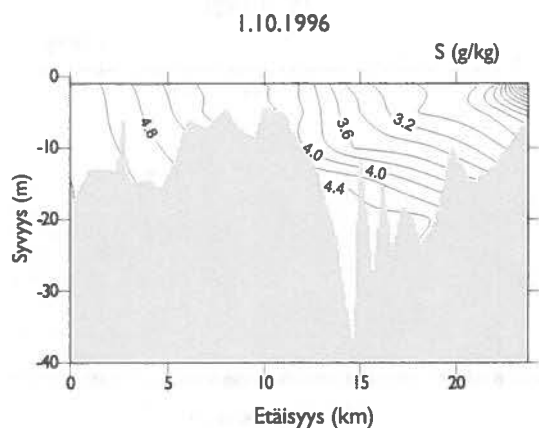


Kuva 16b. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 12.8. ja 21.8.1996. X-akselilla etäisyys pisteestä 11 (ks. kuva 7).

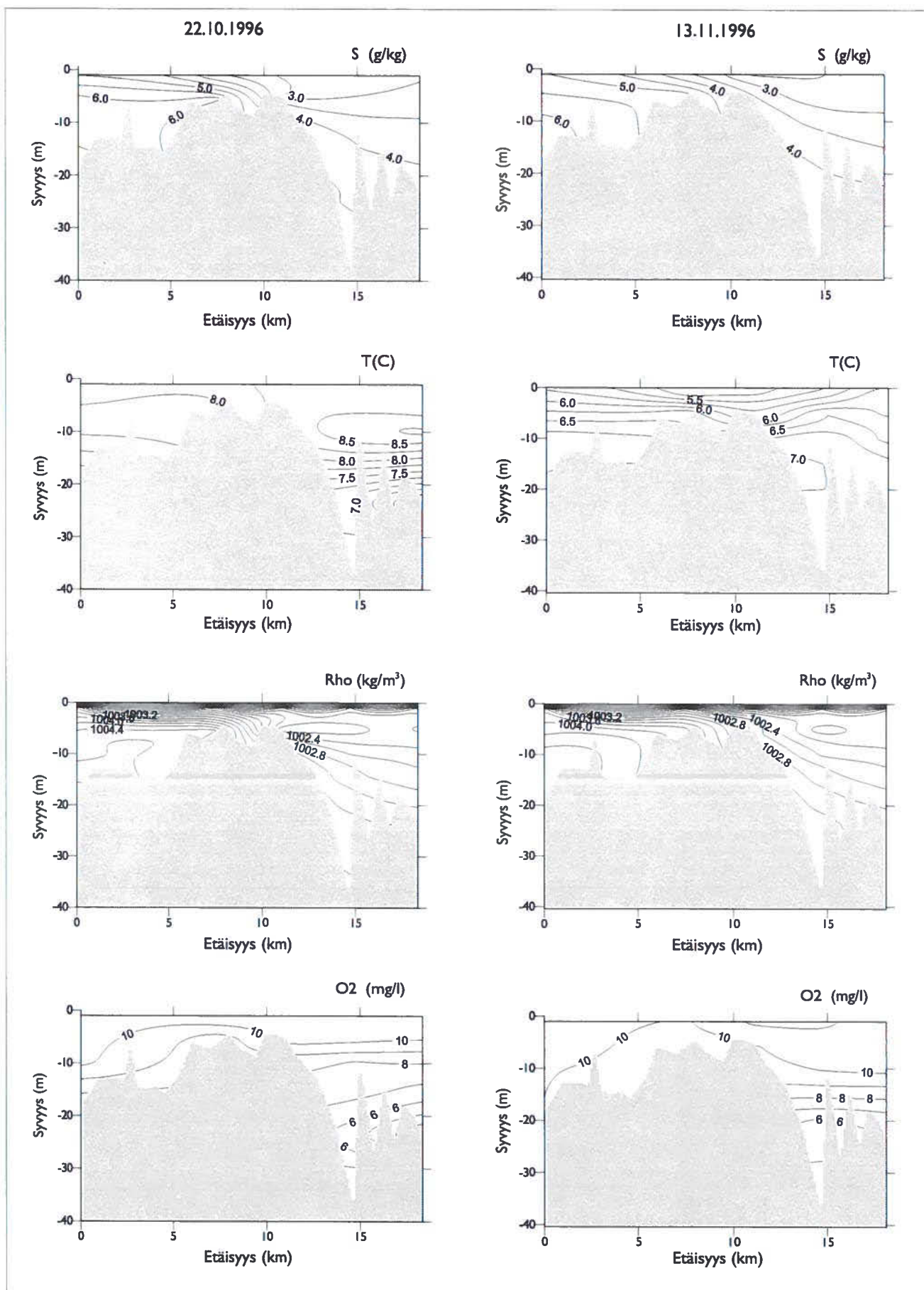




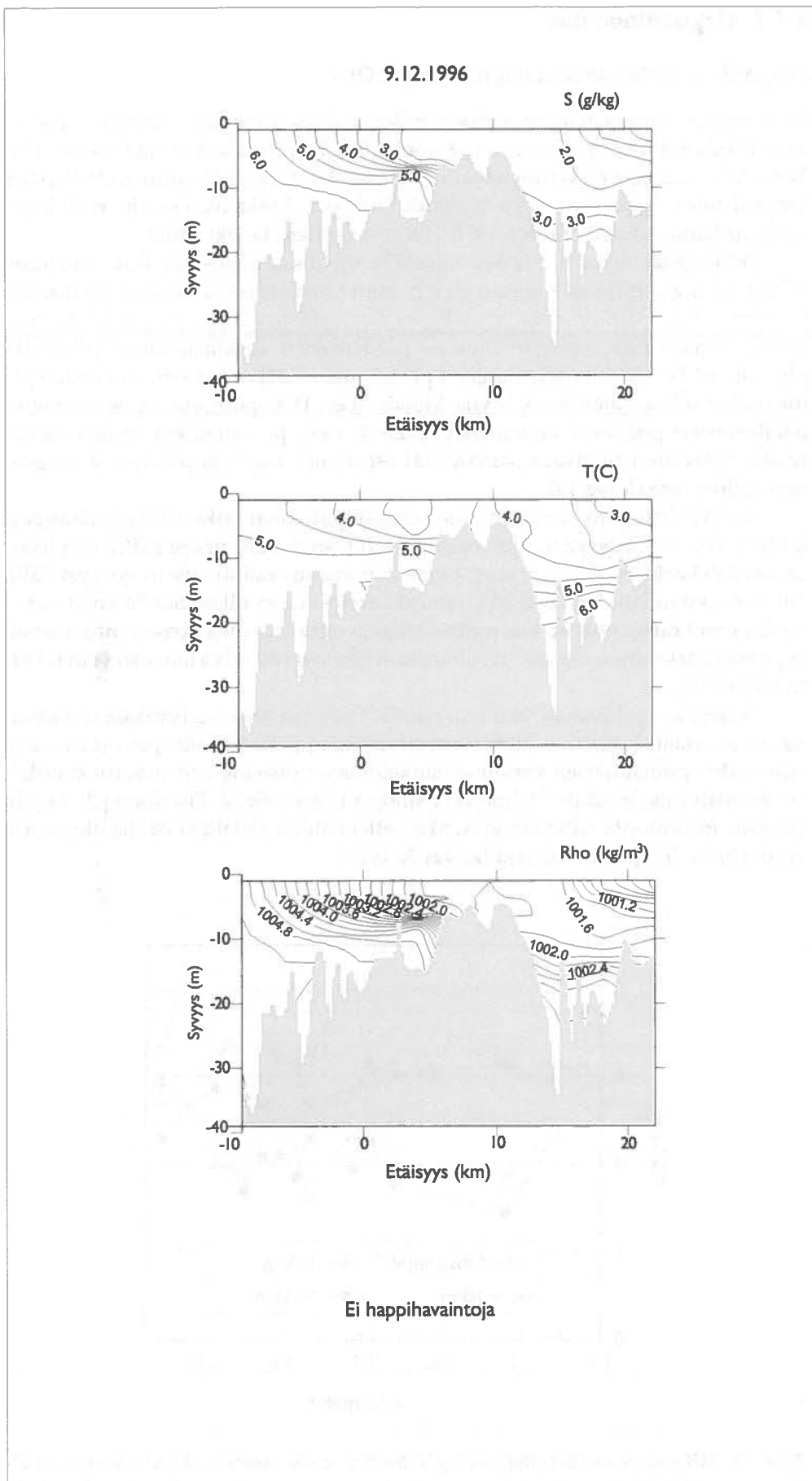
Kuva 17a. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 3.9. ja 16.9.1996. X-akselilla etäisyys pisteestä s11 (ks. kuva 7).



Kuva 17b. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 1.10. ja 10.10.1996. X-akselilla etäisyys pisteestä s11 (ks. kuva 7).



Kuva 18a. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 22.10. ja 13.11.1996. X-akselilla etäisyys pisteestä s11 (ks. kuva 7).



**Kuva 18b. Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 9.12. 1996. X-akselilla etäisyys pisteestä s11 (ks. kuva 7).**



### 3.1.2 Orgaaninen hiili

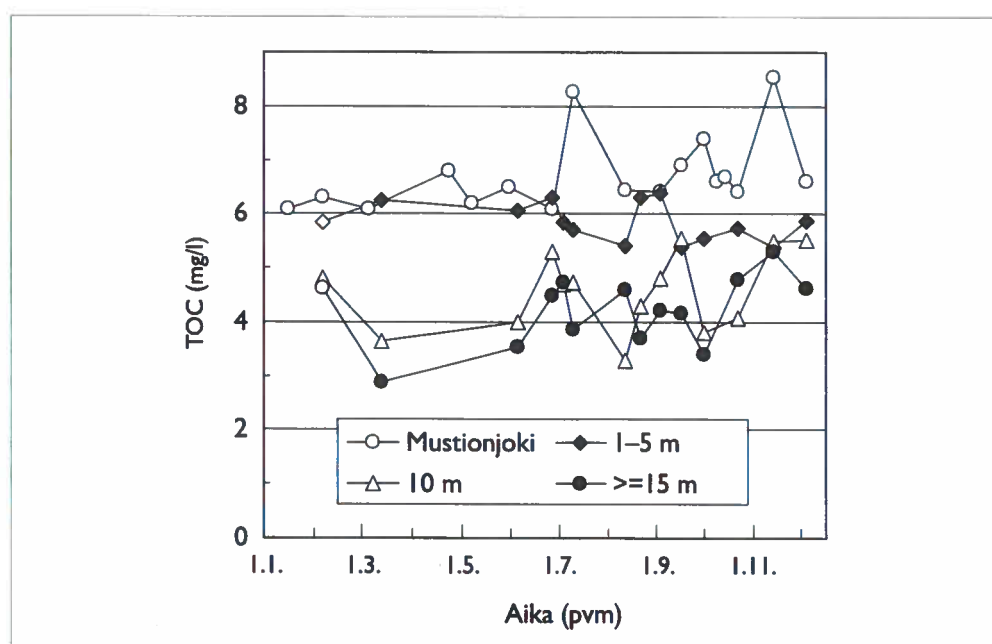
#### Orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus (TOC)

Mustionjoen suualueella orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus vaihteli vuonna 1996 välillä 5,8–11 mg l<sup>-1</sup>, suurin osa tuloksista oli kuitenkin 6–7 mg l<sup>-1</sup> (kuva 19). Tässä tarkastelussa käytettiin havaintopaikan Mustionjoki 4,9 tulosten lisäksi 0,5 km jokisuusta sijaitsevan havaintopaikan tuloksia, koska näin saatiin mahdollisimman kattava kuva vuoden 1996 TOC-pitoisuuksista jokisuulla.

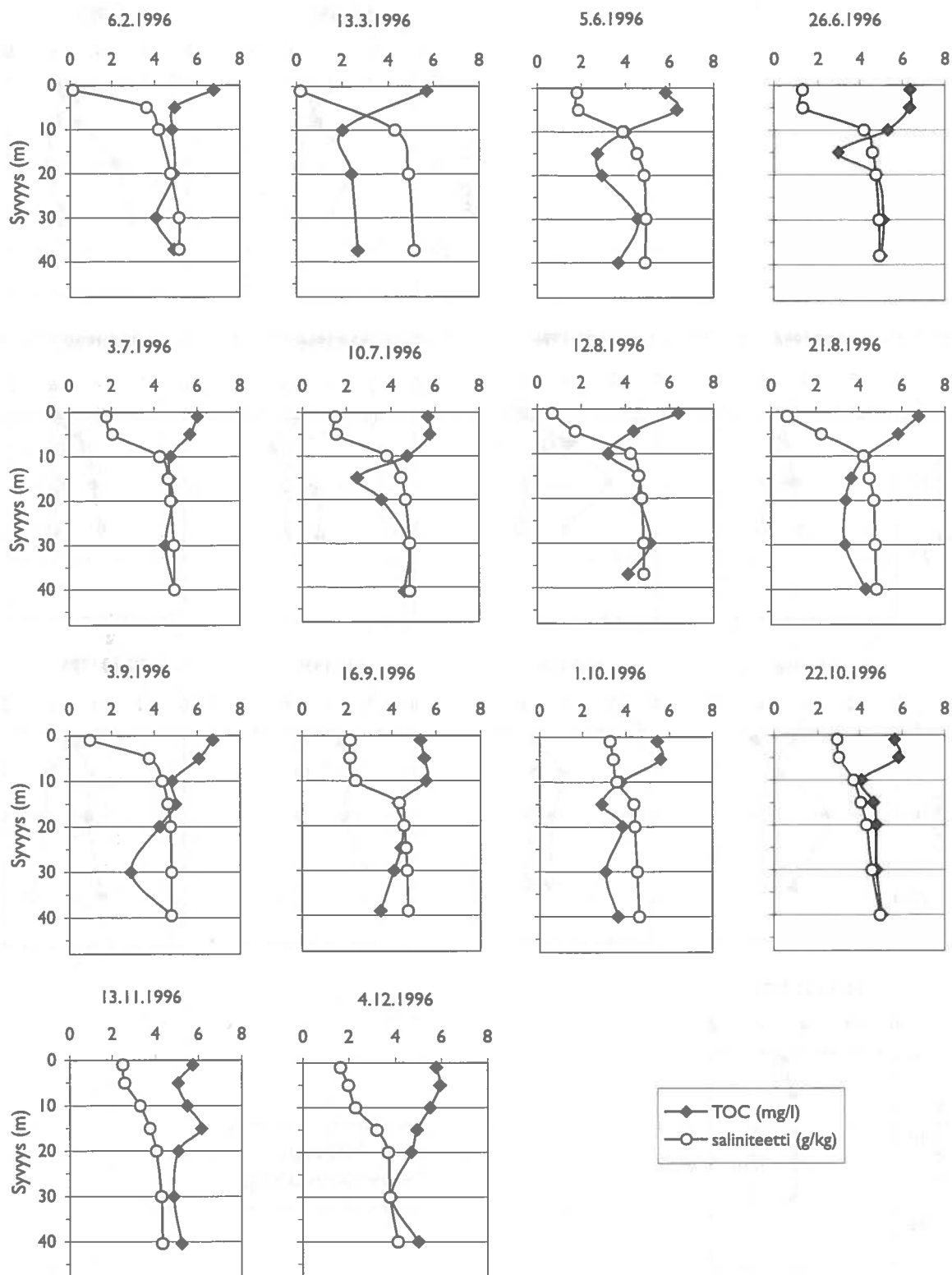
Pohjanpitäjänlahdelta ja sen edustalta otetuissa näytteissä TOC-pitoisuus oli 2,0–6,8 mg l<sup>-1</sup> eli jonkin verran alempi kuin Mustionjoessa. Se oli voimakkaasti riippuvainen saliniteetista ja päänlyysvedessä yleensä korkeampi kuin alusvedessä, etenkin Pohjanpitäjänlahdella. Päänlyysveden keskimääräinen pitoisuus pisteellä p10 oli lähellä Mustionjoen pitoisuutta keskikesään asti, alusveden pitoisuuden ollessa alempi. Syksyllä Mustionjoen TOC-pitoisuuden noustessa ei päänlyysveden pitoisuus kuitenkaan noussut, vaan pikemminkin hieman laski. Koska alusveden pitoisuus samanaikaisesti nousi, tasoittui päänlyys- ja alusveden välinen ero (kuva 19).

Vertikaalista pitoisuusvaihtelua voidaan parhaiten tarkastella havaintopaikoilla p10 ja p14. Syksyä lukuun ottamatta TOC-pitoisuus pisteellä P10 oli yleensä selvästi korkein lähellä pintaa. Alhaisin pitoisuus esiintyi usein syvyysvälillä 10–20 m (kuva 20). Pisteellä p14 Tammisaaren siltojen ulkopuolella eivät vertikaaliset erot olleet yhtä selviä, mutta sielläkin pitoisuus oli yleensä pinnan läheisyydessä korkeampi, erityisesti silloin, kun pinnassa oli selvä makean veden kerros (kuva 21).

Alueelliset pitoisuuserot olivat pieniä. Yhden metrin pitoisuuksia tarkasteltaessa nähdään kuitenkin jonkin verran laskua jokisuusta ulospäin (kuva 22). Alusveden pitoisuuksien vertailua hankaloittavat pisteiden syvyyserot ja erilaiset kerrostumisolosuhteet lahdella ja siltojen ulkopuolella. Pisteiden p10 ja p14 pitoisuusprofiileista nähdään kuitenkin, ettei näiden pisteiden välillä ole suuria eroja alusveden pitoisuuksissa (kuvat 20 ja 21).

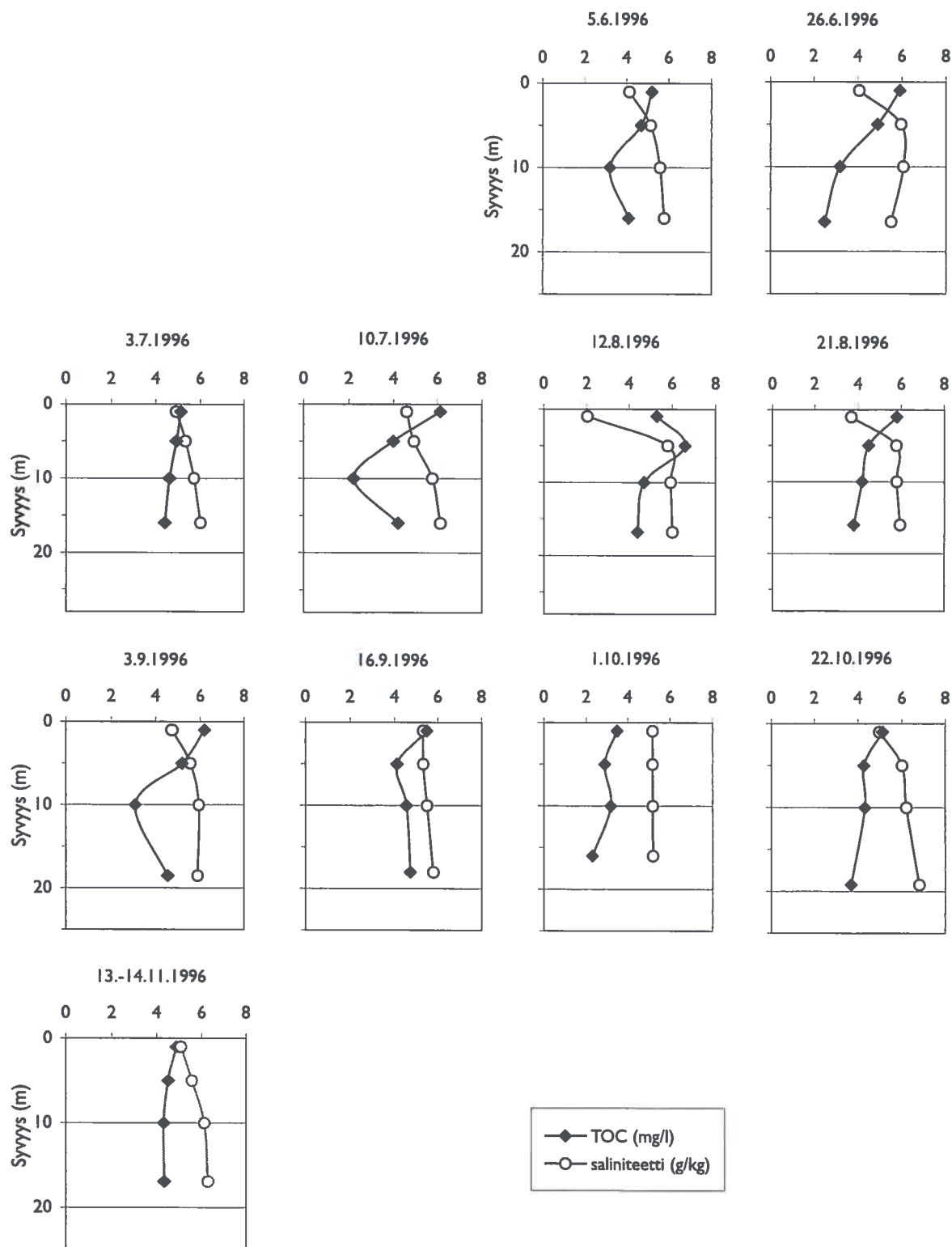


Kuva 19. TOC-pitoisuus havaintopaikan p10 päänlyys- ja alusvedessä sekä Mustionjoen suulla vuonna 1996. Päänlyys- ja alusveden pitoisuudet ovat aritmeettisia keskiarvoja. Myös jokinäytteistä on esitetty keskiarvo, jos samana päivänä on otettu useampia näytteitä.

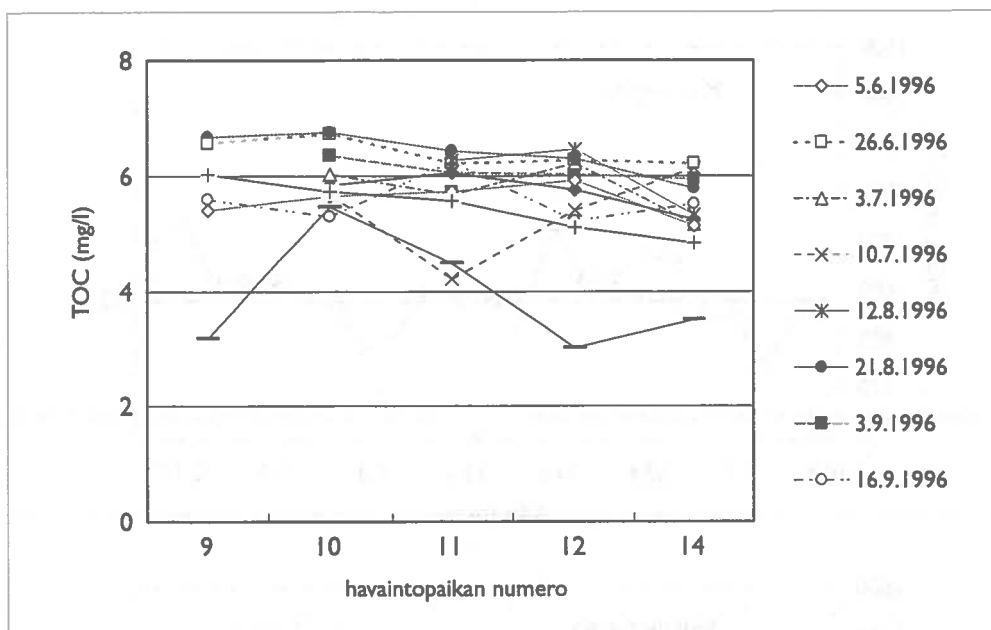


Kuva 20. TOC-pitoisuus ja suolaisuus havaintopaikalla p10 vuonna 1996.





Kuva 21. TOC-pitoisuus ja suolaisuus havaintopaikalla p14 vuonna 1996.



Kuva 22. TOC-pitoisuus eri havaintopaikoilla yhden metrin syvyydessä vuonna 1996.

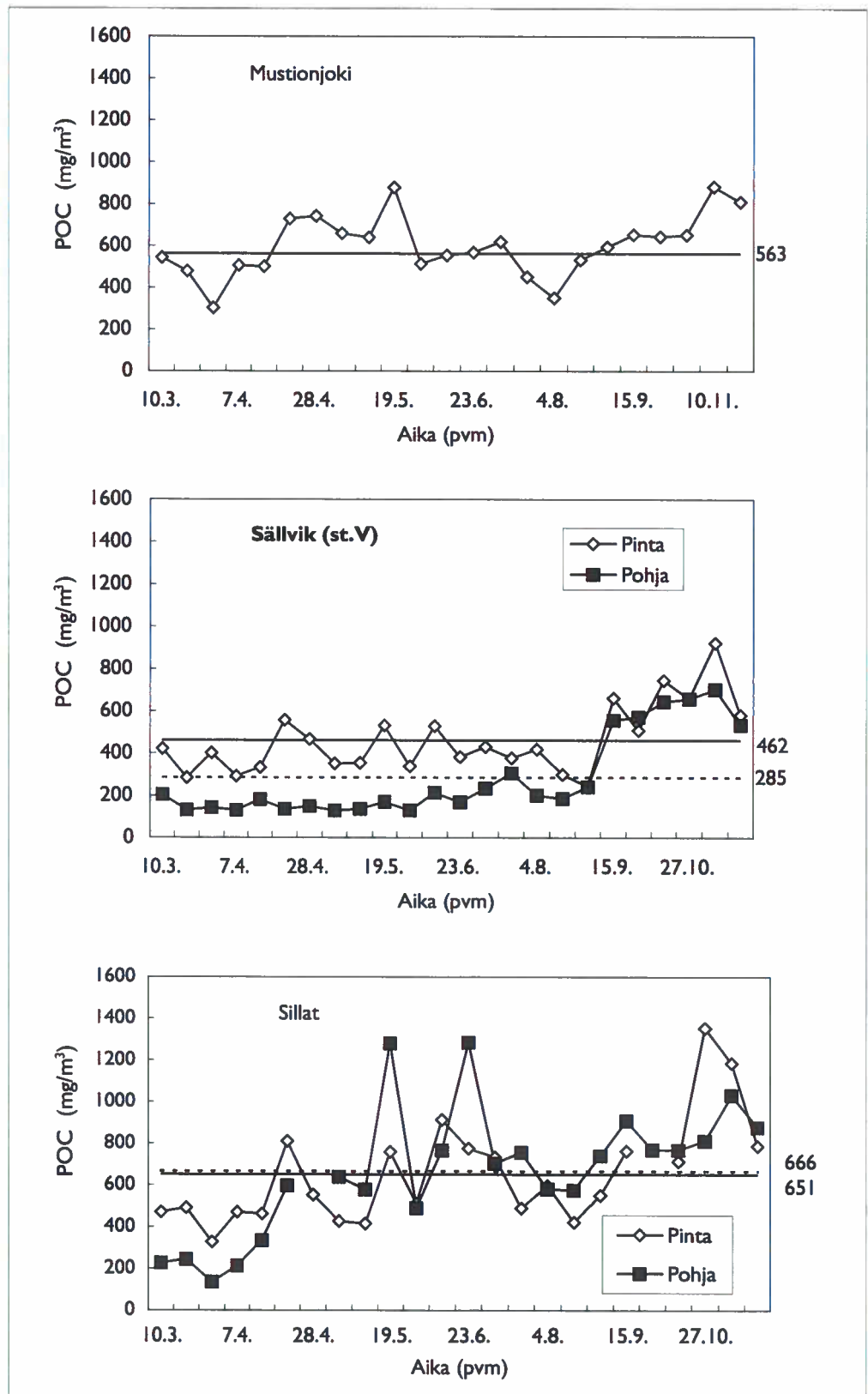
### Hiukasmaisen hiili (POC)

Tässä tutkimuksessa ei määritetty hiukasmaisen hiilen pitoisuutta, mutta tuloksia oli käytettävissä vuodelta 1992. Tällöin POC-pitoisuus oli Sällvikin syvänteiden alusvedessä keväällä ja kesällä (10.3.–17.8.) keskimäärin  $170 \text{ mg m}^{-3}$ . Syksyllä (15.9.–25.11.) se oli yli kolme kertaa suurempi, keskimäärin  $590 \text{ mg m}^{-3}$  (kuva 23). Mustionjoessa ja Tammisaaren silloilla POC-pitoisuus oli syksyllä vain 20–30 % suurempi kuin aiemmin ko. vuonna. Keskimääräinen POC-pitoisuus oli silloilla hieman korkeampi kuin Mustionjoessa ja lähes kaksi kertaa niin suuri kuin Sällvikin syvänteellä.

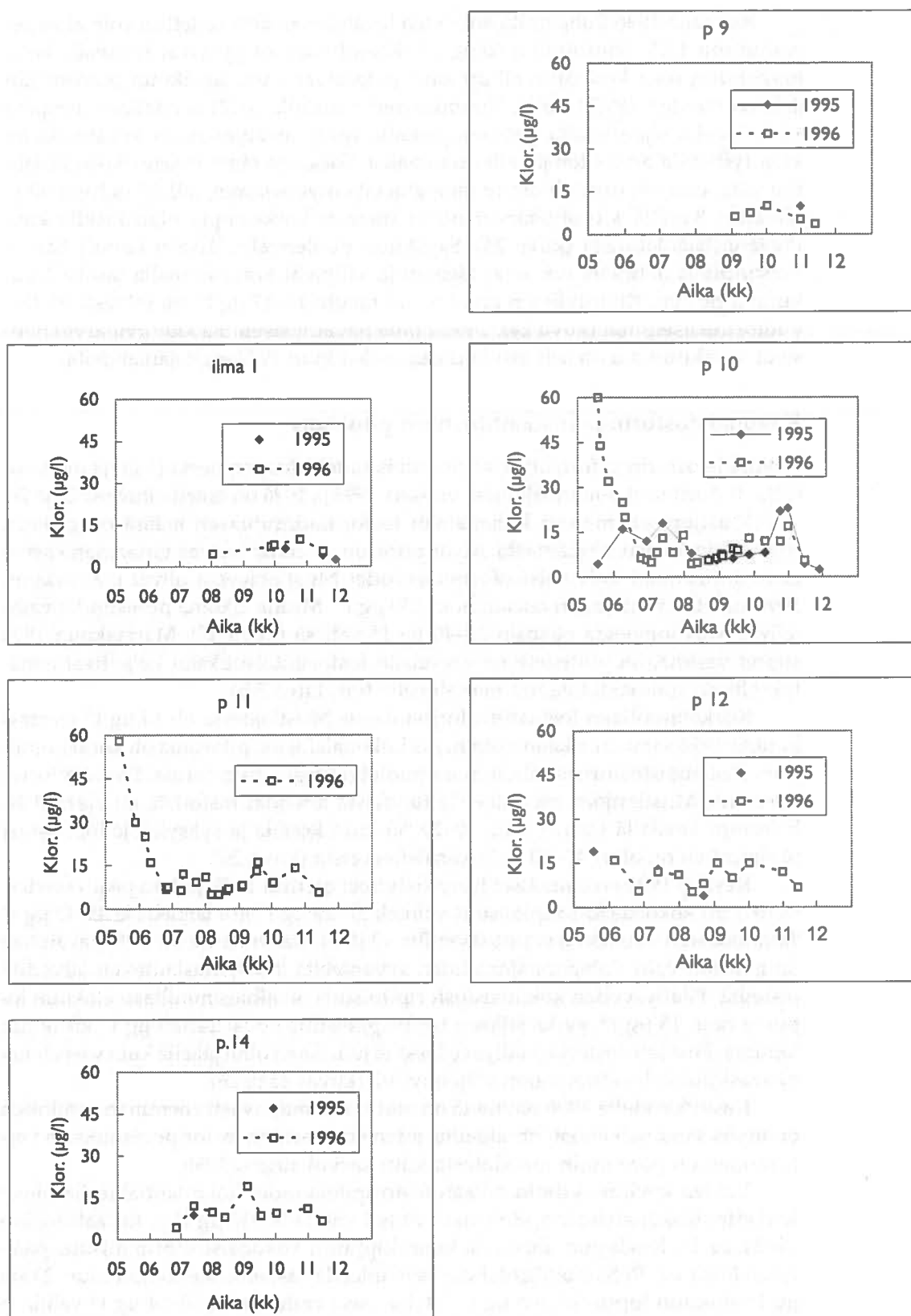
### 3.1.3 Klorofylli a ja ravinnepitoisuudet

#### Klorofylli a

Keväällä 1995 ensimmäinen klorofyllinäyte otettiin 18.5. Kevätkukinta oli tällöin jo ohi Pohjanpitäjänlahdella ja klorofylli a:n arvo oli noin  $5 \mu\text{g l}^{-1}$ . Tammisaaren edustalla (p12) sen sijaan klorofylli a:n arvo oli korkeampi: noin  $20 \mu\text{g l}^{-1}$  ja ulompana merialueella noin  $10 \mu\text{g l}^{-1}$ . Kesä–heinäkuussa klorofylli a:n arvot olivat Pohjanpitäjänlahdella noin  $12\text{--}17 \mu\text{g l}^{-1}$  ja samaa suuruusluokkaa ulompana merialueella. Sen jälkeen klorofylliarvot pysyivät melko alhaisina lokakuun alkupuolelle asti (klorofylli a alle  $10 \mu\text{g l}^{-1}$ ). Lokakuun alkupuolella klorofyllissä tapahtui nousua ensin selvästi Pohjanpitäjänlahden sisäosissa (p 9) ja sen jälkeen syvänealueella (p 10, ilma 1). Klorofylliarvot pysyivät korkeina koko lokakuun ajan (klorofylli a  $20\text{--}24 \mu\text{g l}^{-1}$ ) ja laskivat vasta marraskuussa alhaiseksi (kuva 24). Ulompana Tammisaaren edustalta ei samaan aikaan otettu näytteitä. Längdenillä ulkomerellä vastaavaan aikaan klorofylli a:n arvo oli noin  $4 \mu\text{g l}^{-1}$ .



Kuva 23. Hiukkasmaisen hiilen pitoisuus (POC;  $\text{mg m}^{-3}$ ) vesinäytteissä Mustionjoen suulla, Sällvikin syvänteessä (pinta 0–15 m, pohja 20–30 m) ja kynnyksalueella Tammisaaren siltojen kohdalla vuoden 1992 tutkimuksessa. Pinta- ja pohjanäytteiden keskimääräinen pitoisuus on merkitty kuviin ehjällä viivalla ja alusveden näytteiden katkoviivalla.



Kuva 24. Klorofylli a:n pitoisuus (0–4 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996.

Keväällä 1996 Pohjanpitäjänlahden leväbiomassassa todettiin voimakas kehähuippu 13.5. (klorofylli a  $60 \mu\text{g l}^{-1}$ ). Klorofylliarvot pysyivät korkealla koko toukokuun sekä kesäkuun alkupuolen ja laskivat vasta kesäkuun puolenvälin jälkeen vuoden 1995 tasolle. Tammisaaren edustalla (p12) ja edelleen ulospäin merialueella sijaitsevalla havaintopaikalla (p14) levätuotannon kevätmaksimi klorofylli a:lla arvioiden jäi alhaisemmaksi. Toisaalta tämä todennäköisesti johtuu siitä, että näytteet oli otettu tältä alueelta myöhemmin, jolloin huippu oli jo ohitettu. Kesällä klorofylliarvot olivat hieman korkeampia ulkoalueella kuin Pohjanpitäjänlahdella (kuva 24). Syyskuun puolenvälin jälkeen klorofylliarvot Pohjanpitäjänlahdella nousivat hieman ja säilyivät korkeammalla tasolla loka-kuun loppuun. Klorofylli a:n arvot olivat tällöin  $12\text{--}17 \mu\text{g l}^{-1}$ , eli selvästi edellisvuotta alhaisemmat (kuva 24). Uloimmilla havaintoasemilla klorofylliarvot nousivat syyskuun alussa selvästi korkeammaksi kuin Pohjanpitäjänlahdella.

### Kokonaisfosforin ja fosfaattifosforin pitoisuus

Kokonaisfosforin ja fosfaattifosforin pitoisuudet Mustionjoessa (1 m) ja merialueella (0–5 m) touko-marraskuussa vuosina 1995 ja 1996 on esitetty kuvissa 25 ja 26.

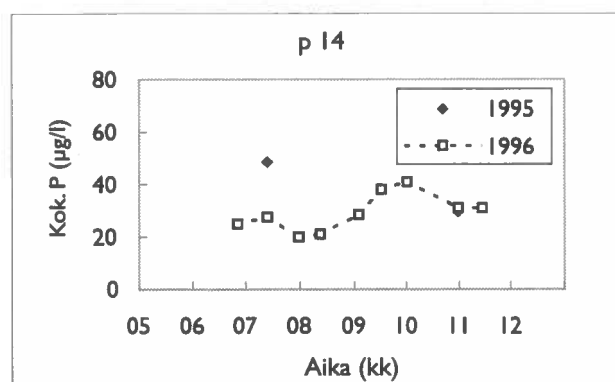
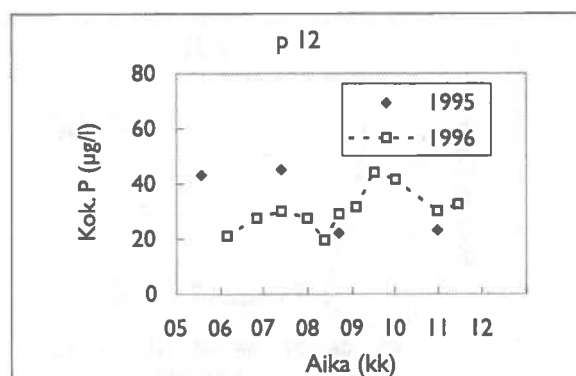
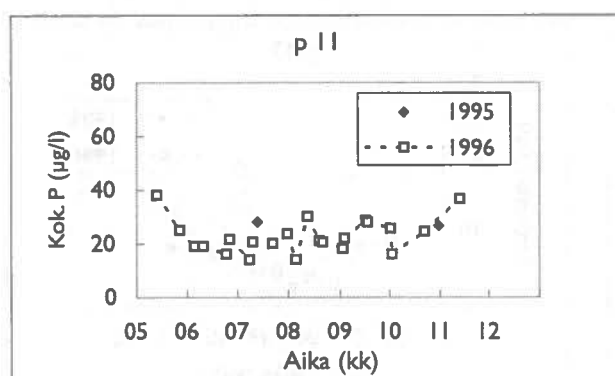
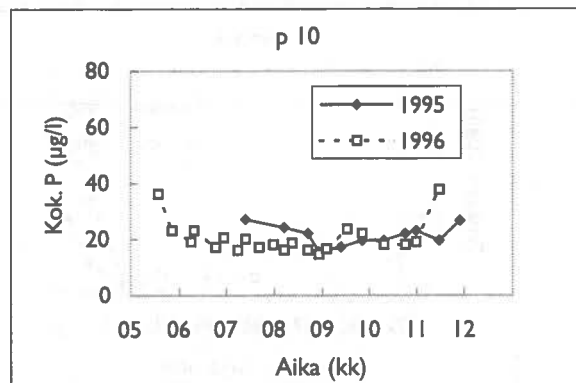
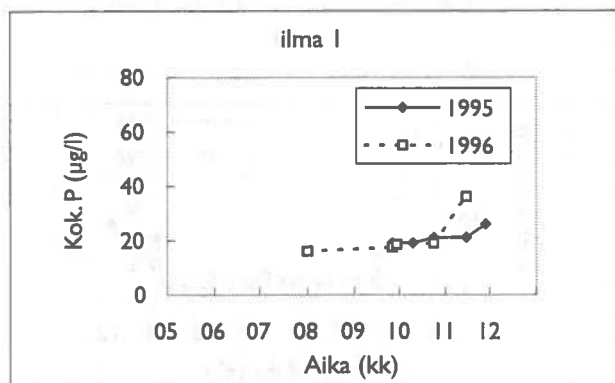
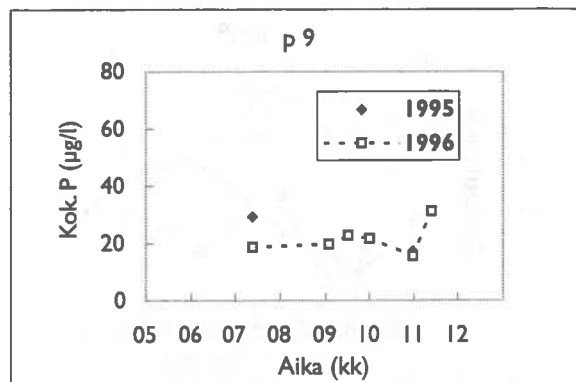
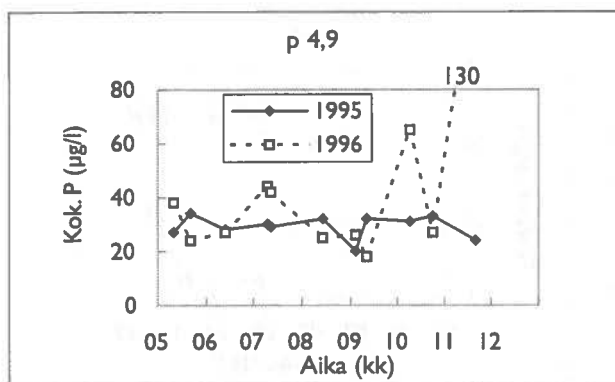
Mustionjoen mereen kuljettaman fosforikuormituksen määrä on pääosin riippuvainen joen virtaamasta. Myös pitoisuus yleensä kasvaa virtaaman kasvaessa. Suurimmat kokonaisfosforipitoisuudet Mustionjoessa olivat marraskuun 1996 suurten virtaamien aikaan noin  $130 \mu\text{g l}^{-1}$ . Muina aikoina pitoisuudet vaihtelivat Mustionjoessa pääosin  $20\text{--}40 \mu\text{g l}^{-1}$  välissä (kuva 25). Marraskuun 1996 suuret vesimäärät yhdistettynä korkeisiin fosforipitoisuuksiin kuljettivat ennätysellisen runsaasti fosforia merialueelle (vrt. kuva 5.b)

Korkeimmillaan fosfaattifosforipitoisuus Mustionjoessa oli  $64 \mu\text{g l}^{-1}$  marraskuussa 1996 samaan aikaan kuin myös kokonaisfosforipitoisuus oli korkeimmillaan. Kokonaisfosforista tällöin noin puolet oli fosfaattifosforina. Fosfaattifosforin osuus Mustionjoen merialueelle tuomasta kokonaisfosforista on yleensä alhaisempi keväällä (osuus noin 10–20 %) kuin kesällä ja syksyllä, jolloin osuus useimmiten on ollut 40–50 % kokonaisfosforista (kuva 26).

Kesällä 1995 ensimmäiset fosforinäytteet otettiin 13.7., jolloin päällysvedessä (0–5 m) kokonaisfosforipitoisuus vaihteli  $27\text{--}29 \mu\text{g l}^{-1}$  itse lahdella ja  $45\text{--}48 \mu\text{g l}^{-1}$  Tammisaaren edustan havaintoasemilla 12 ja 14. Kasvukaudelta 1995 havaintoja on pääosin vain Pohjanpitäjänlahden syvänteeltä ja hapetuslauttojen läheisiltä pisteiltä. Päällysveden kokonaisfosforipitoisuus oli alhaisimmillaan elokuun lopussa noin  $15 \mu\text{g l}^{-1}$ , jonka jälkeen fosforipitoisuus nousi 24:ään  $\mu\text{g l}^{-1}$  lokakuun lopussa. Fosfaattifosforia päällysvedessä ei juurikaan ollut jäljellä kuin vasta lokamarraskuussa levätuotannon vähennyttyä (kuvat 25 ja 26).

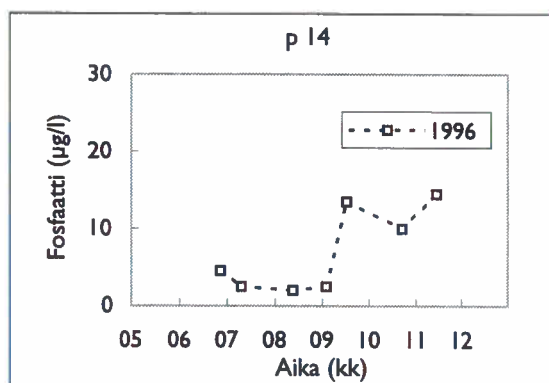
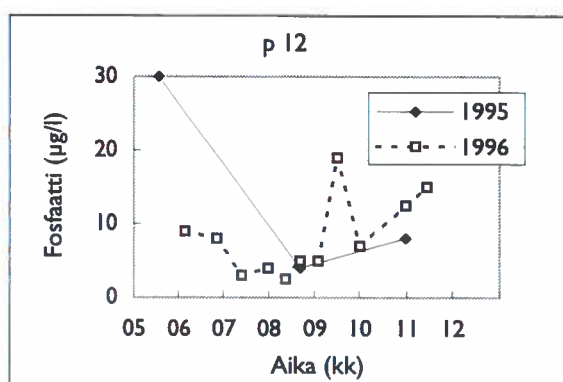
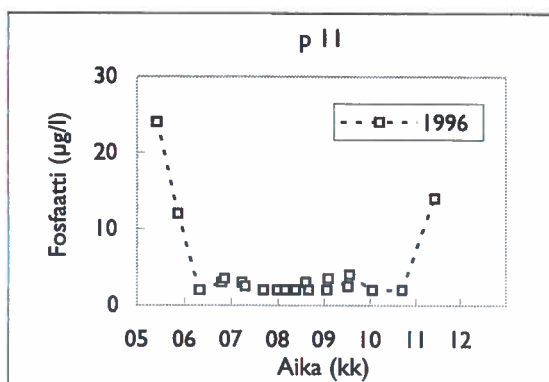
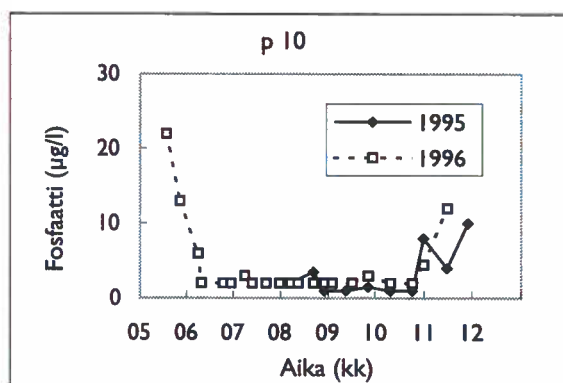
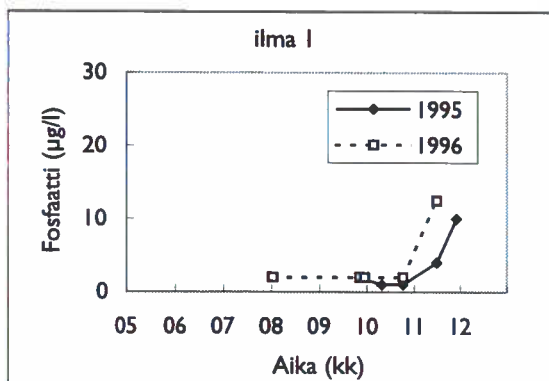
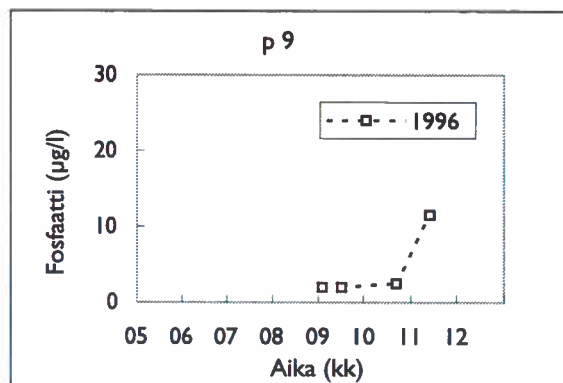
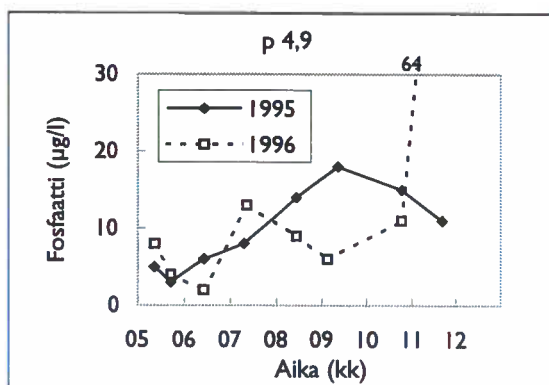
Kasvukaudella 1996 näytteitä on otettu huomattavasti enemmän ja tuloksia on myös samanaikaisesti eri alueilta, joten eri alueiden fosforipitoisuuksien vertaaminen on paremmin mahdollista kuin kasvukautena 1995.

Levien kevätmaksimin aikaan fosforipitoisuudet koko lahtialueella olivat korkeita. Kokonaisfosforipitoisuus vaihteli välillä  $38\text{--}36 \mu\text{g l}^{-1}$  ja fosfaattifosfori  $22\text{--}24 \mu\text{g l}^{-1}$ . Kesäkuun alusta elokuun loppuun kokonaisfosforipitoisuus päällysvedessä oli Pohjanpitäjänlahden syvänteellä laskenut kesäkuun alun 23:sta  $\mu\text{g l}^{-1}$  elokuun lopun 15:een  $\mu\text{g l}^{-1}$ . Eteläosassa vaihtelu oli  $30\text{--}14 \mu\text{g l}^{-1}$  välillä ja ulkoalueella  $30\text{--}20 \mu\text{g l}^{-1}$  välillä. Fosfaattifosforipitoisuus oli Pohjanpitäjänlahden päällysvedessä kesällä yleensä kaikilla havaintokerroilla alle määritysrajan ( $2 \mu\text{g l}^{-1}$ ), ulompana merialueella fosfaattifosforia oli jonkin verran jäljellä (kuvat 25 ja 26).

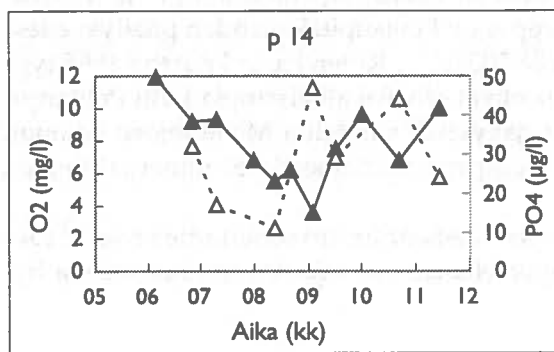
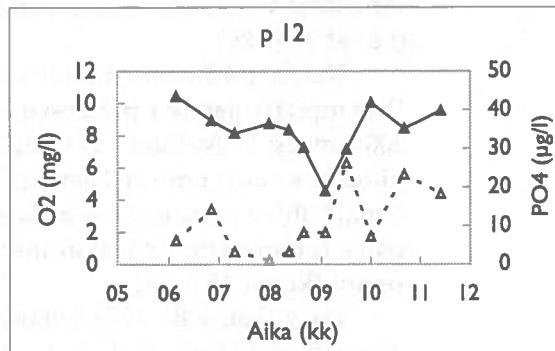
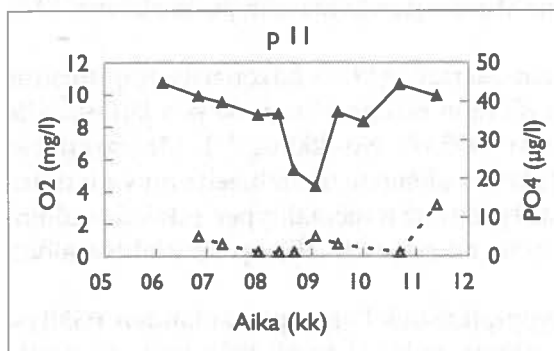
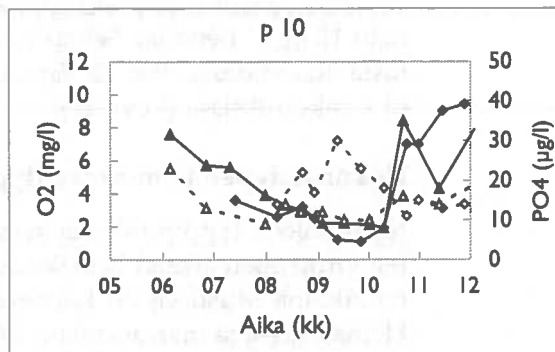
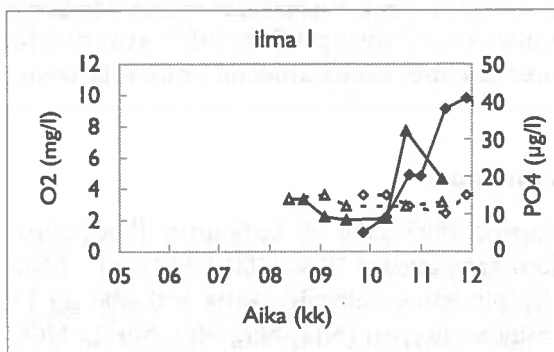
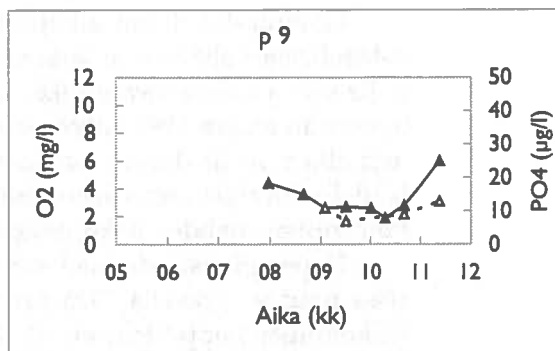
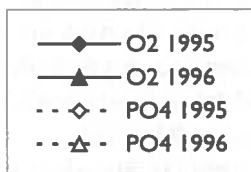


Kuva 25. Kokonaisfosforin pitoisuus (joessa 1 m ja merialueilla 0–5 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996.





Kuva 26. Fosfaattifosforin pitoisuus (joessa 1 m ja merialueilla 0–5 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996.



Kuva 27. Pohjanläheisen vesikerroksen (pohja-1 m) happi- ja fosfaattipitoisuus eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996.

Elokuun-lokakuun alkupuolen 1996 fosforihuuhtouma Mustionjoesta oli suhteellisen vähäinen ja kokonaisfosforipitoisuudet Mustionjoen havaintoasemilla olivat eräillä havaintokerroilla alhaisemmat kuin Tammisaaren edustalla. Syyskuun alussa 1996 kokonaisfosforipitoisuudet nousivat ensin voimakkaammin ulkoalueella (havaintoasemat 12 ja 14) ja myöhemmin myös Pohjanpitäjänlahdella. Marraskuussa fosforihuuhtouman kasvu Mustionjoesta nosti myös koko Pohjanpitäjänlahden kokonaisfosforipitoisuutta (kuvat 25 ja 26).

Hapen pitoisuuden aletessa fosfaatin pitoisuus pohjanläheisissä vesikerroksissa nousee. Syksyllä 1995 fosfaattia liukeni Pohjanpitäjänlahden syvänteellä heikoimman happitilanteen aikoihin siten, että enimmillään pohjan läheisen vesikerroksen fosfaattipitoisuus oli  $30 \mu\text{g l}^{-1}$ . Syksyllä 1996 happitilanne ei kehittynyt yhtä heikoksi ja pohjan läheisen vesikerroksen fosfaattipitoisuus pysytteli noin  $10 \mu\text{g l}^{-1}$  tienoilla. Selvästi enemmän kuin Pohjanpitäjänlahden syvänteellä fosfaattia vuonna 1996 oli Tammisaaren ulkopuolisella alueella pohjan läheisissä vesikerroksissa (kuva 27).

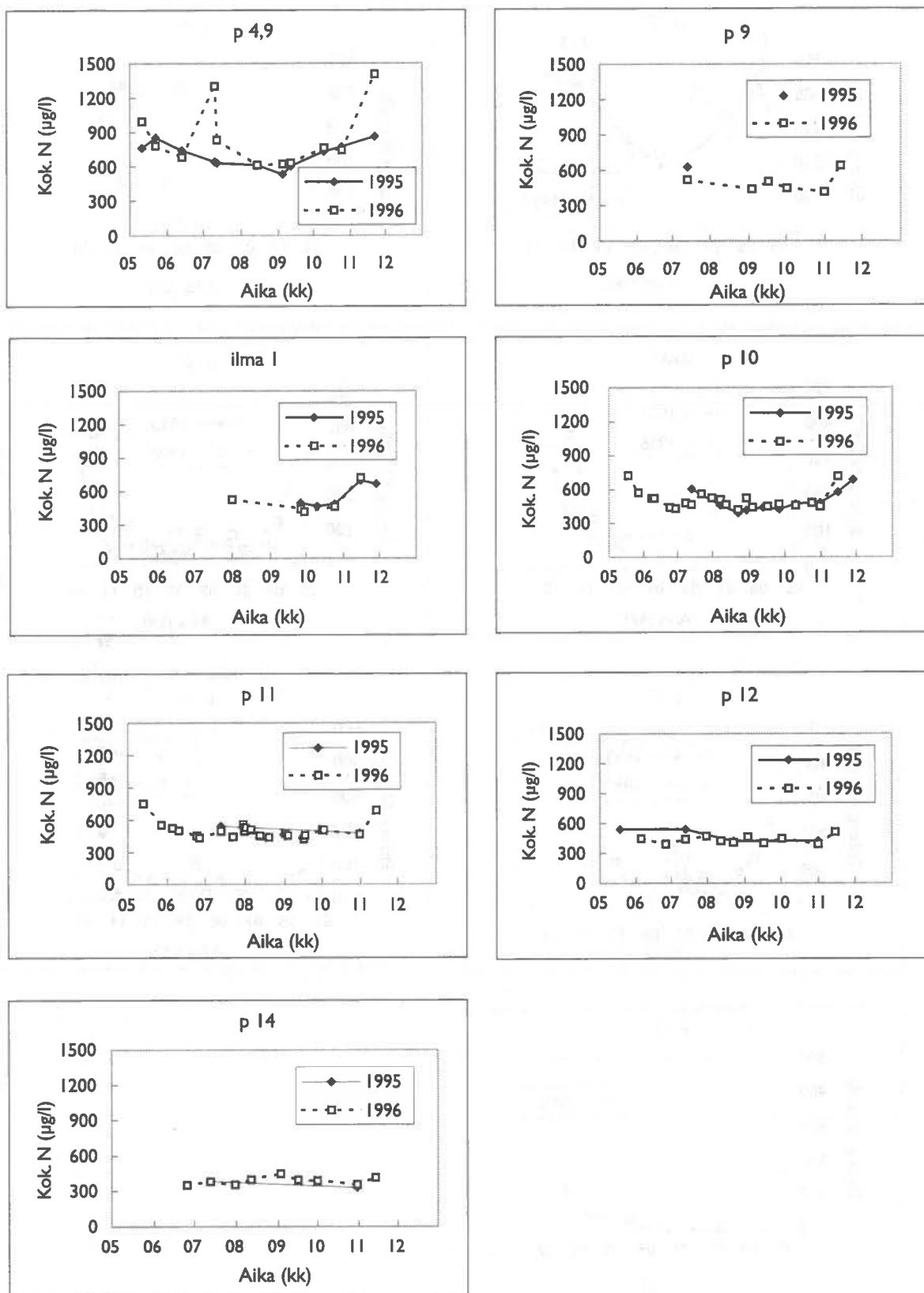
### Kokonaistypen ja mineraalitypen pitoisuus

Mustionjoen typpipitoisuus kasvukausina 1995–1996 oli korkeimmillaan suurten virtaamien aikaan heinäkuussa ja marraskuussa 1996  $1300\text{--}1400 \mu\text{g l}^{-1}$ . Muina aikoina Mustionjoen kokonaistyyppipitoisuus vaihteli välillä  $600\text{--}800 \mu\text{g l}^{-1}$ . Heinäkuussa ja marraskuussa 1996 mineraalitypen ( $\text{NH}_4\text{-N:n}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N:n}$  ja  $\text{NO}_2\text{-N:n}$  summa) pitoisuus oli  $420\text{--}810 \mu\text{g l}^{-1}$ , eli  $40\text{--}60\%$  kokonaistypestä. Kesän alivirtaamakausina mineraalitypen osuus Mustionjoen kokonaistypestä oli noin  $40\%$  (kuvat 28 ja 29).

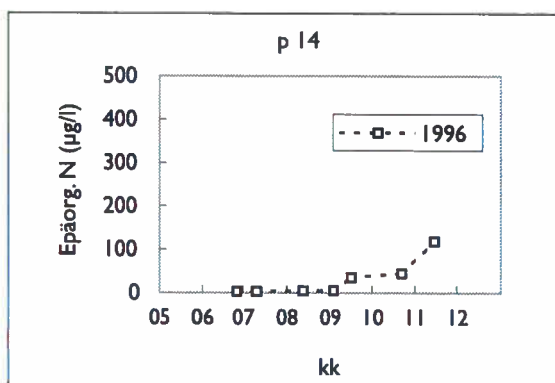
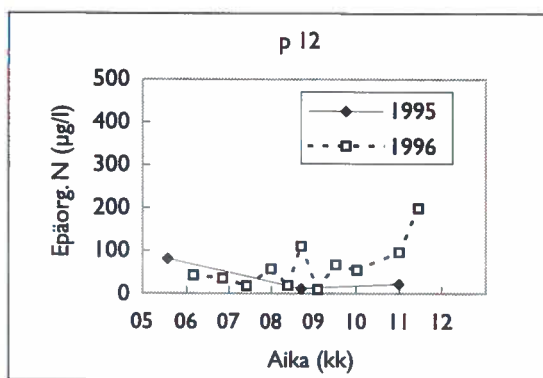
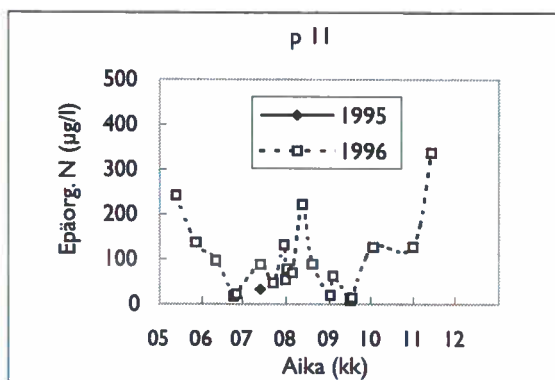
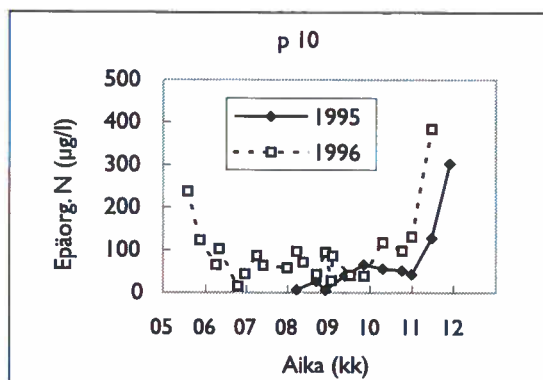
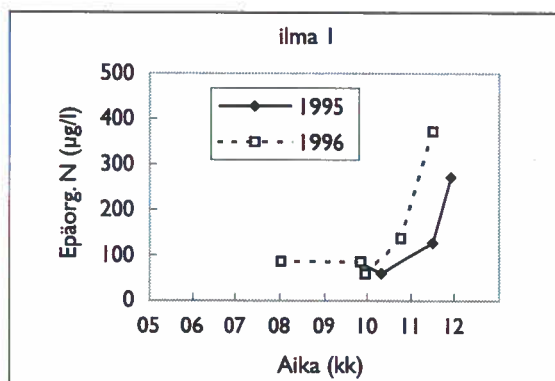
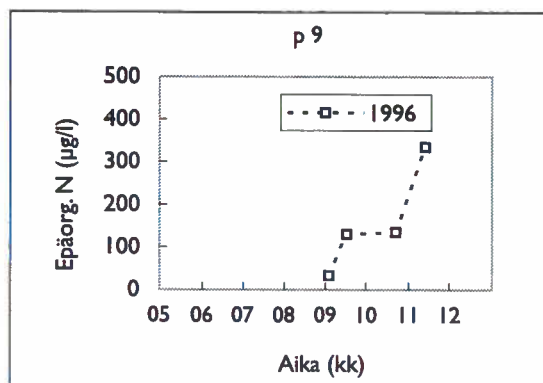
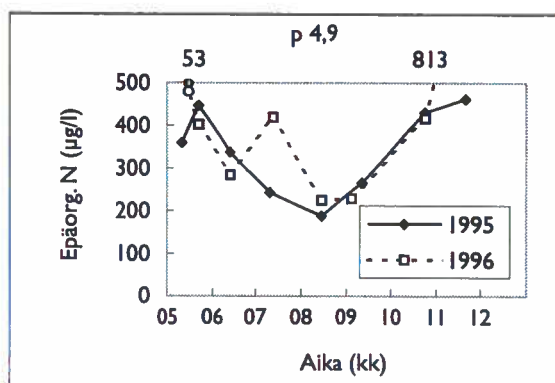
Kesän 1995 ensimmäisellä havaintokerralla (13.7.) kokonaistyyppipitoisuus Pohjanpitäjänlahden päällysvedessä oli noin  $600 \mu\text{g l}^{-1}$  ja laski sen jälkeen alle  $500\text{:aan} \mu\text{g l}^{-1}$  (vaihtelu elo-lokakuussa 1995 oli  $390\text{--}480 \mu\text{g l}^{-1}$ ). Marraskuussa pitoisuus nousi noin  $700\text{:aan} \mu\text{g l}^{-1}$ . Tuloksia ulompaa merialueelta on vain muutama. Niiden perusteella sekä kokonaistypen että mineraalitypen pitoisuus ulompana Tammisaaren edustan merialueella oli selvästi Pohjanpitäjänlahtea alhaisempi (kuvat 28 ja 29).

Kasvukaudella 1996 kokonaistyyppipitoisuus Pohjanpitäjänlahden päällysvedessä ensin laski toukokuun noin  $700\text{:sta} \mu\text{g l}^{-1}$  vähän yli  $400\text{:aan} \mu\text{g l}^{-1}$ , mutta nousi heinäkuussa huuhtoutumien kasvun vuoksi yli  $500\text{:aan} \mu\text{g l}^{-1}$  ja marraskuussa yli  $700\text{:aan} \mu\text{g l}^{-1}$ . Mineraalityppeä oli Pohjanpitäjänlahden päällysvedessä kesällä noin  $50\text{--}100 \mu\text{g l}^{-1}$  ja syksyllä  $300 \mu\text{g l}^{-1}$ . Kuten kasvukautena 1995 typpipitoisuudet ulompana merialueella olivat selvästi alhaisempia kuin Pohjanpitäjänlahdella, eikä niissä juuri ollut näkyvissä vaihtelua Mustionjoen tuoman kuormituksen mukaisesti. Kesällä ulompana merialueella ei mineraalityppeä juurikaan ollut jäljellä (kuva 29).

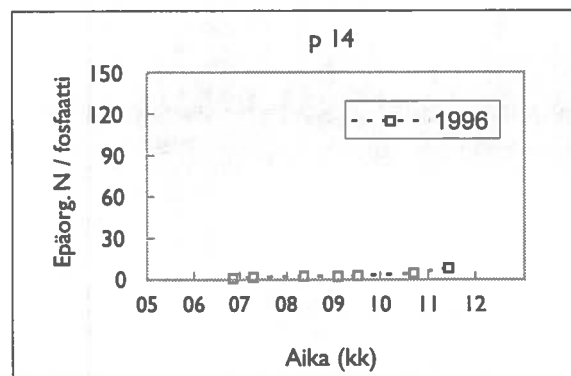
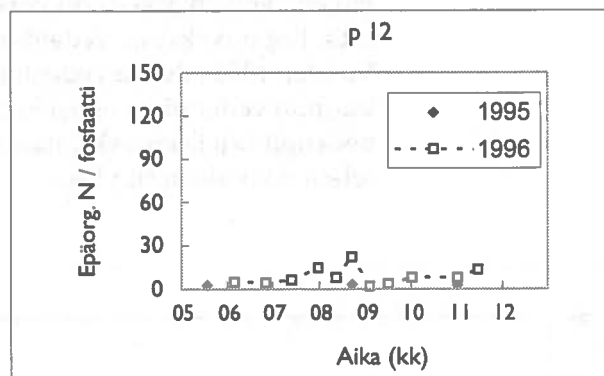
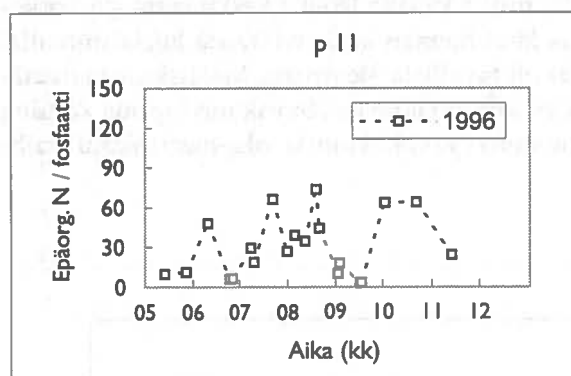
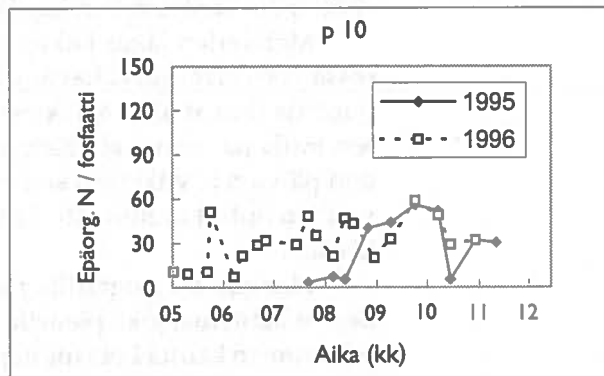
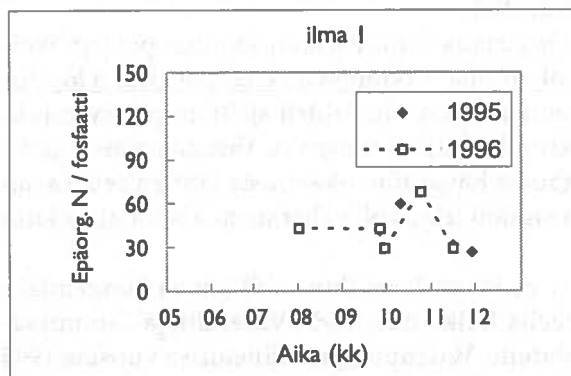
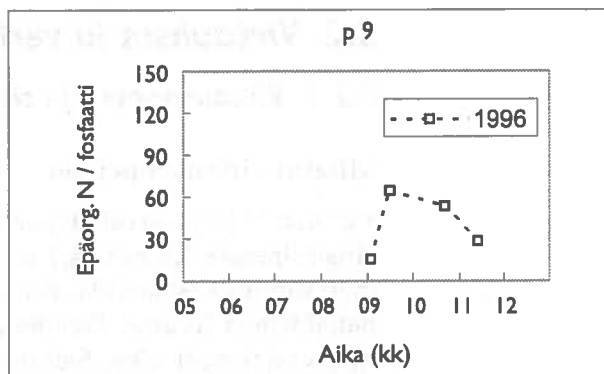
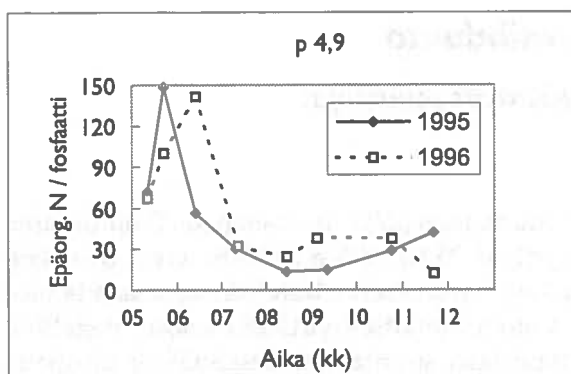
Pohjanpitäjänlahdella pääravinteista fosfaattifosfori useimmiten rajoitti tuotantoa, kun taas Tammisaaren ulkopuolella kasvua rajoittavana ravinteena hyvin usein oli typpi (kuva 30).



Kuva 28. Kokonaistypen pitoisuus (joessa 1 m ja merialueilla 0–5 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996.



Kuva 29. Mineraalitypen ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ ) pitoisuus (1 ja 5 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996.



Kuva 30. Mineraaliravinteiden suhteet (epäorgaaninen typpi/fosfaatti fosfori) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996.



## 3.2 Virtaukset ja veden vaihdunta

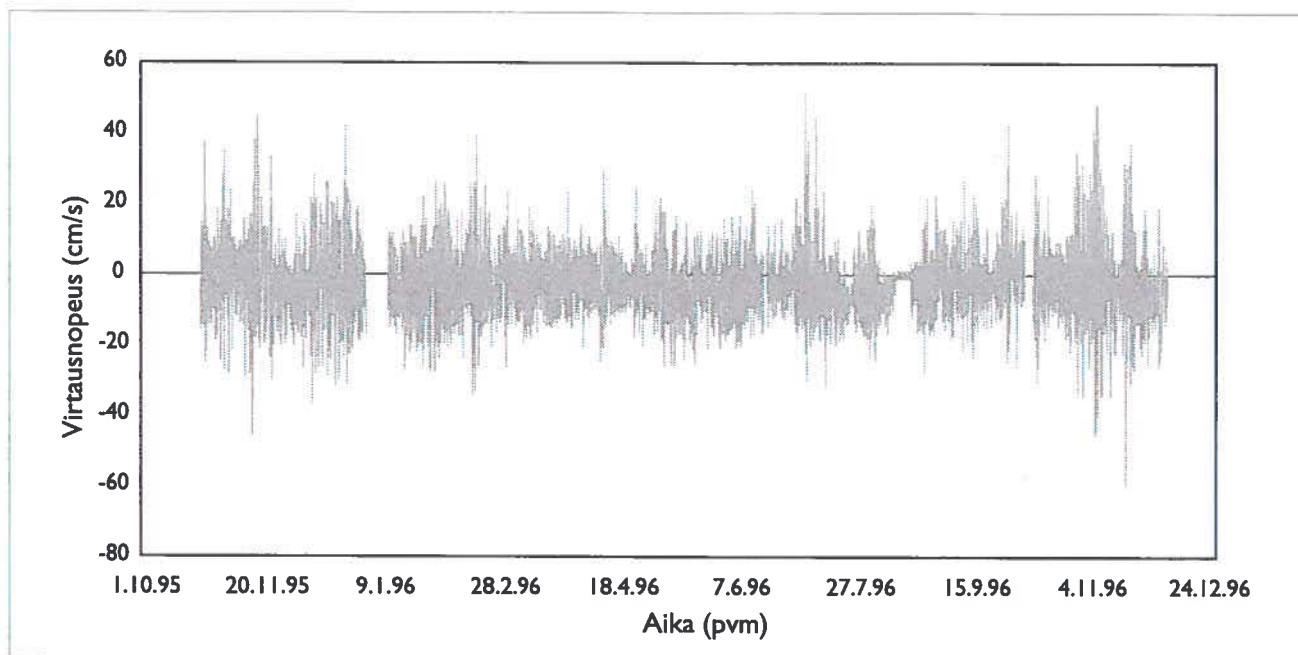
### 3.2.1 Virtausnopeus ja sitä selittävät muuttujat

#### Mitatut virtausnopeudet

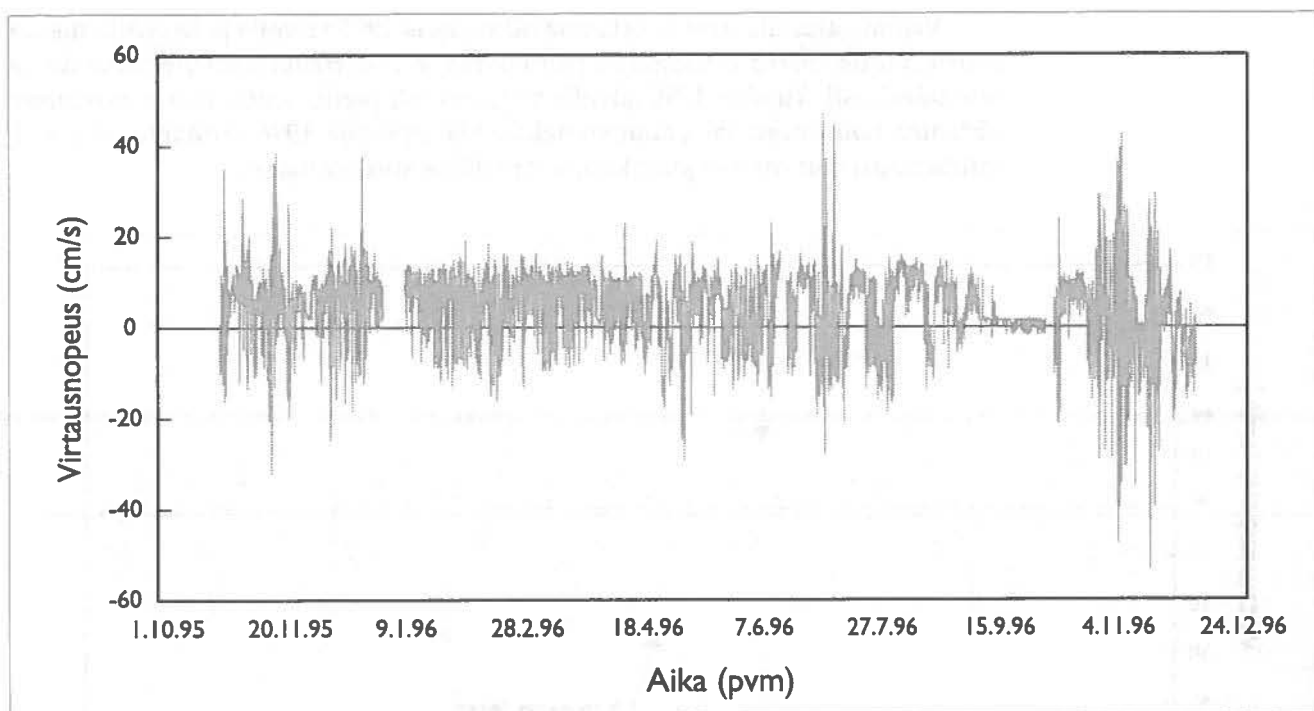
Kuvissa 31 ja 32 on esitetty salmen suuntainen ( $27^\circ$ ) virtausnopeus Tammisaaren länsisalmissa 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä 25.10.1995–8.12.1996. Arvot ovat kolmen tunnin keskiarvoja. Kuvista näkyy virtauksen edestakainen, sisään ja ulos heilahteleva luonne. Positiivinen suunta merkitsee virtausta sisään, negatiivinen vastaavasti ulos. Salmen pintavirtaus suuntautuu keskimäärin ulospäin. Pintavirtauksesta poiketen syvyydellä 4,5 m virtaus suuntautuu pääsääntöisesti sisäänpäin (erityisesti syksyllä ja talvella).

Meriveden lähes jatkuva sisäänvirtaus Tammisaaren salmien pohjanläheisessä vesikerroksessa havaittiin molempina tutkimusvuosina. Lokakuun loppupuolella (kuvat 33 ja 34) pohjanläheinen virtaus heilahteli ajoittain pintavirtauksen mukana, mutta ei kääntynyt kuin hetkittäin ulospäin. Vastaavanlaisia useiden päivien ja viikkojen sisäänvirtausta havaittiin lokakuusta lähtien seuraavan vuoden huhtikuuhun asti. Talvella sisäänvirtaus oli vähemmän katkonaista kuin kesällä.

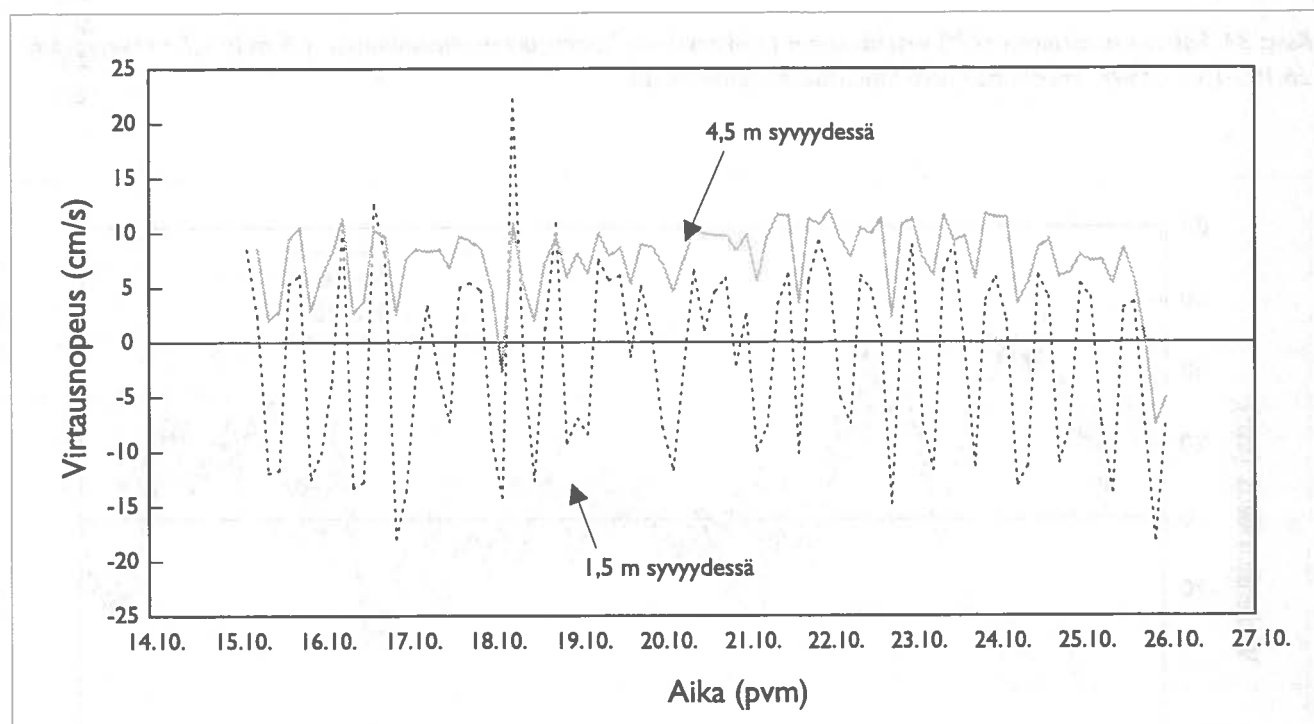
Hangon mareografilla mitattu vedenkorkeus (kuva 35) kuvaa Suomenlahden heilahtelua, joka pienellä viiveellä kulkeutuu myös Vitsandin ja Tammisaaren salmien kautta Pohjanpitäjänlahdelle. Vedenpinnan vaihteluissa vuosina 1995 ja 1996 ei ollut havaittavissa vuodenaikaan sidottua säännöllisyyttä. Vuoden 1995 talvella vedenkorkeus oli korkealla, mutta kesällä lähellä keskimääräistä korkeutta. Loppusyksystä vedenkorkeus kävi hieman keskimääräistä korkeammalla. Vuoden 1996 talvella vedenkorkeus oli tavallista alempana. Maaliskuusta heinäkuuhun vedenpinta nousi hitaasti yli keskimääräisen. Syyskuun loppua kohden vedenpinta jälleen laski hitaasti, nousten syys-lokakuun ja loka-marraskuun vaihteissa voimakkaasti ylös.



Kuva 31. Salmen suuntainen ( $27^\circ$ ) virtausnopeus (3h-keskiarvo) Tammisaaren länsisalmissa 1,5 m syvyydessä 25.10.–8.12.1996. Positiivinen arvo tarkoittaa sisäänvirtausta.

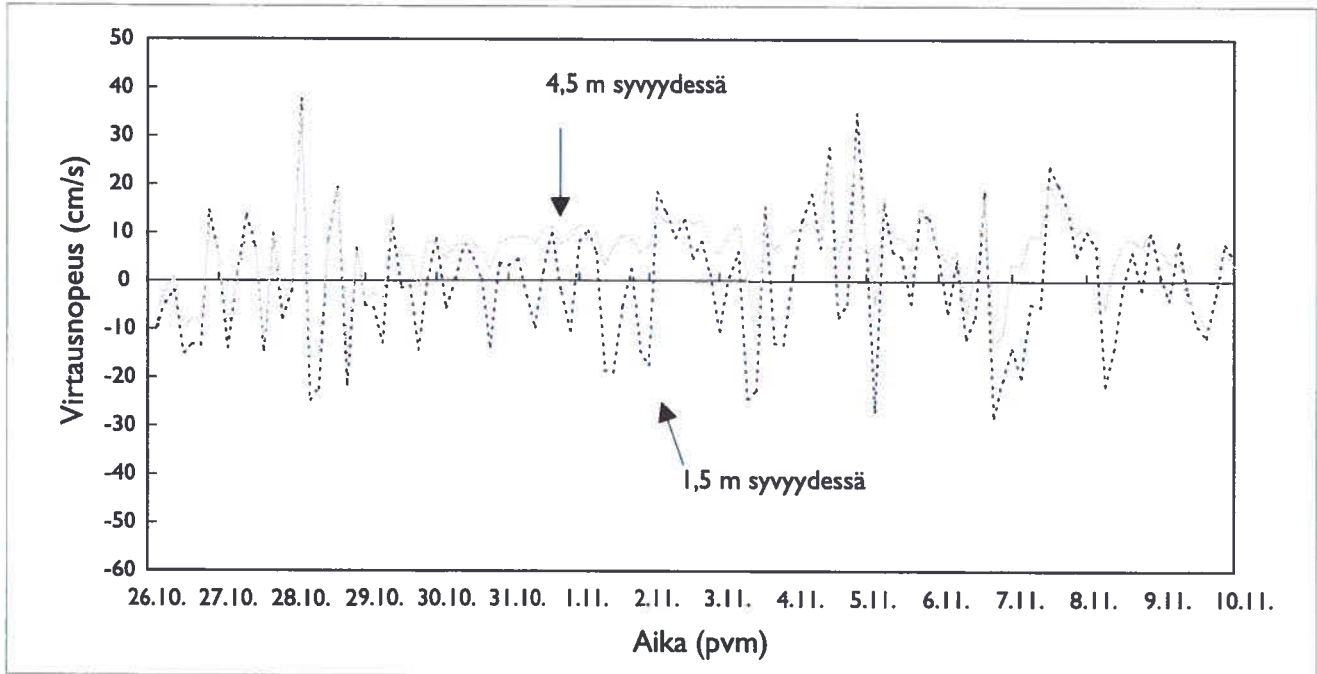


Kuva 32. Salmen suuntainen ( $27^\circ$ ) virtausnopeus (3h-keskiarvo) Tammisaaren länsisalmissa 4,5 m syvyydessä 25.10.–8.12.1996. Positiivinen arvo tarkoittaa sisäänvirtausta.

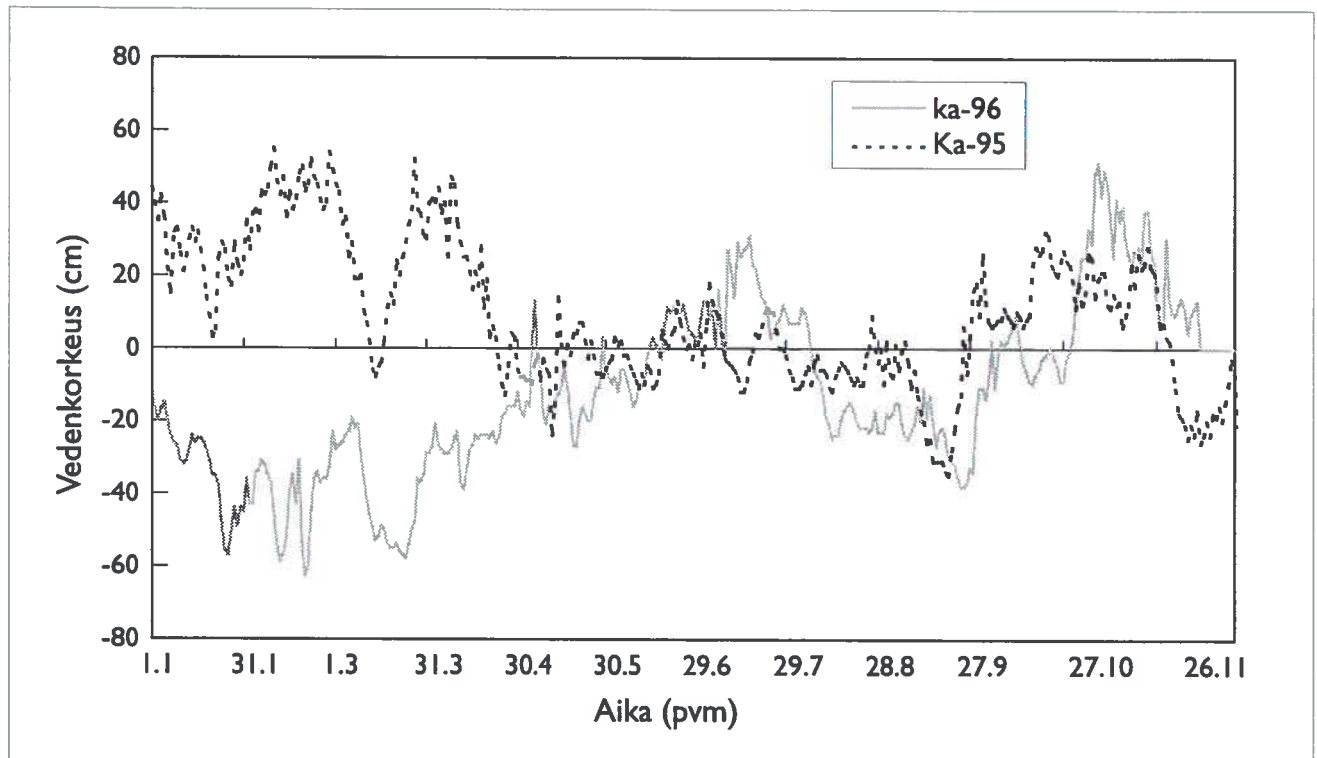


Kuva 33. Salmen suuntainen ( $27^\circ$ ) virtausnopeus (3h-keskiarvo) Tammisaaren länsisalmissa 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä 15.–25.10.1995. Positiivinen arvo tarkoittaa sisäänvirtausta.

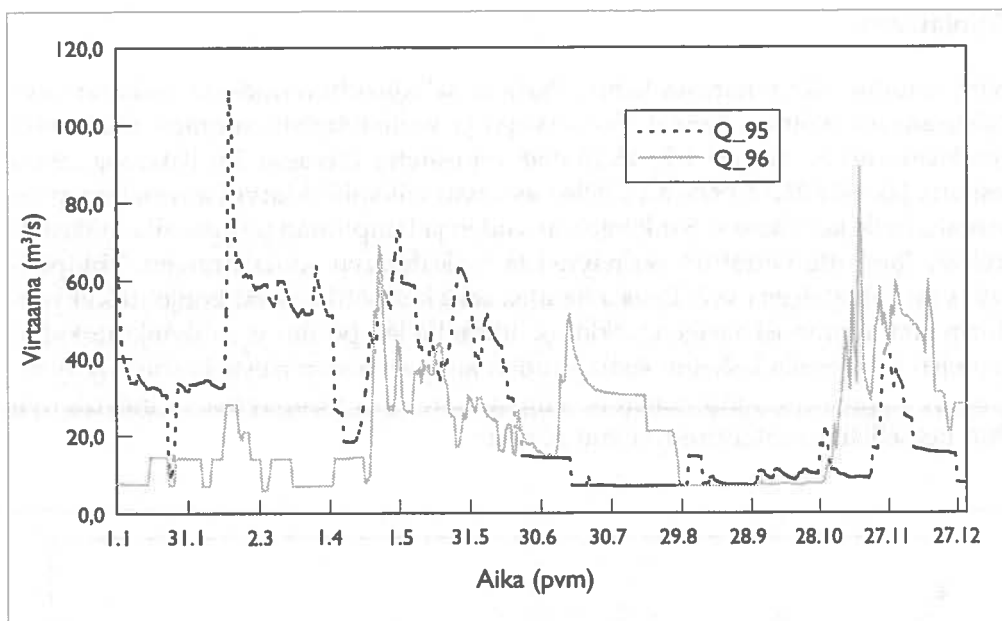
Valuma-alueelta tuleva virtaama oli vuonna 1995 talvella ja keväällä melko suurta, mutta kesällä virtaama oli pieni (kuva 36). Marraskuussa virtaama nousi lyhytaikaisesti. Vuoden 1996 talvella virtaama oli pieni, mutta heinä-elokuussa virtaama nousi normaalia suuremmaksi. Alkusyksyllä 1996 virtaama oli pieni, mutta nousi taas marras-joulukuussa tavallista suuremmaksi.



Kuva 34. Salmen suuntainen (27°) virtausnopeus (3h-keskiarvo) Tammisaaren länsisalnessa 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä 26.10.–10.11.1996. Positiivinen arvo tarkoittaa sisäänvirtausta.



Kuva 35. Vedenkorkeuden vuorokausikeskiarvot Hangon mareografilla vuosina 1995–1996.

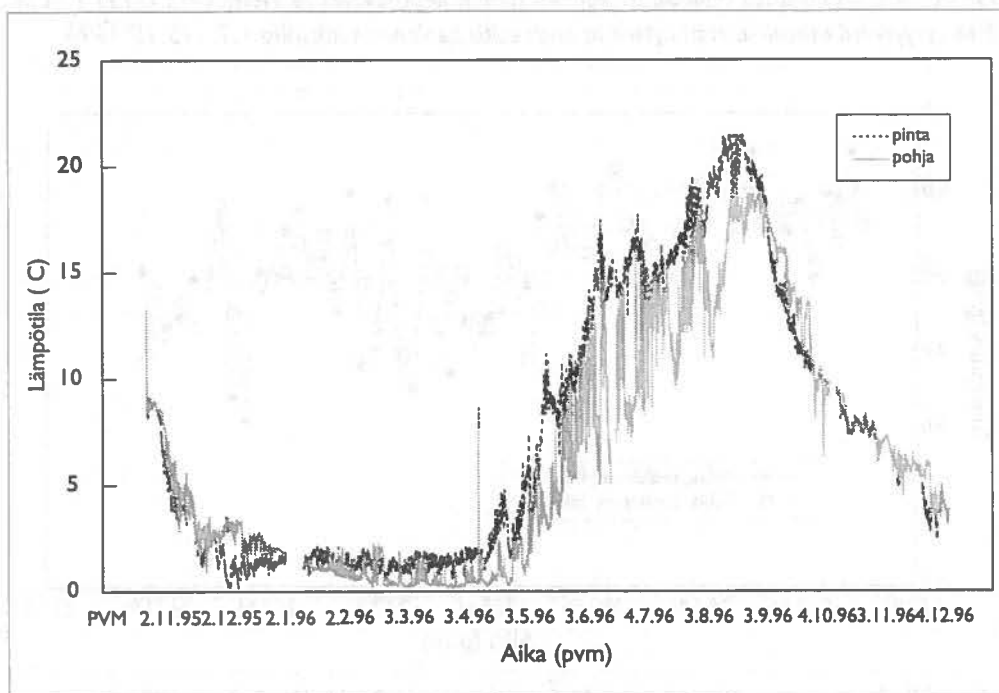


Kuva 36. Valuma-aluevirtaama Pohjanpitäjänlahdelle vuosina 1995–1996.

### 3.2.2 Lämpötilan, suolaisuuden ja tiheyden vaihtelu

#### Lämpötila

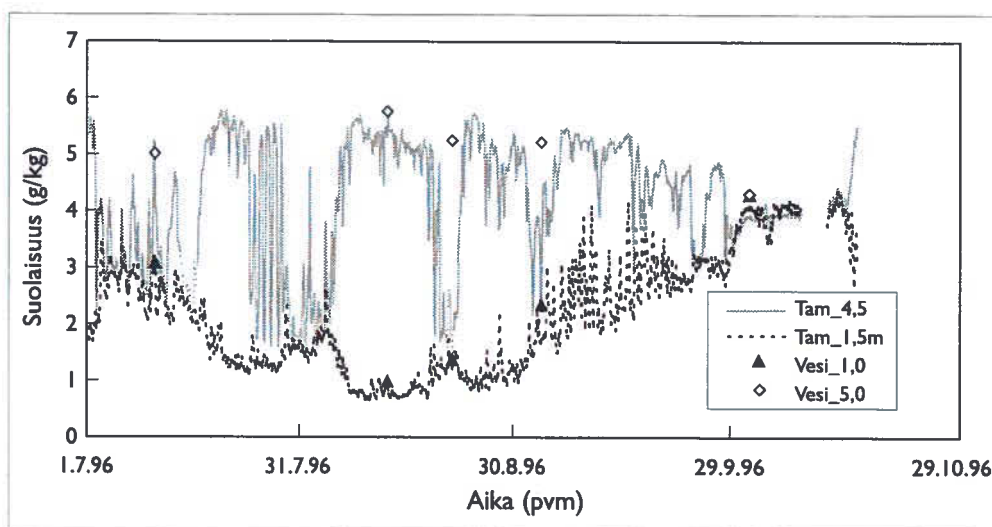
Lämpötila Tammisaaren salmissa 1,5 metrin syvyydessä vaihteli kesän noin 20 °C:sta talven 1–2 °C:een (kuva 37). 4,5 metrin syvyydessä vesi oli talvella 1–2 °C lämpimämpää ja kesällä 5–10 °C kylmempää kuin 1,5 metrin syvyydessä. 4,5 metrin syvyydessä lämpötila vaihteli kesällä virtausten vaikutuksesta nopeasti.



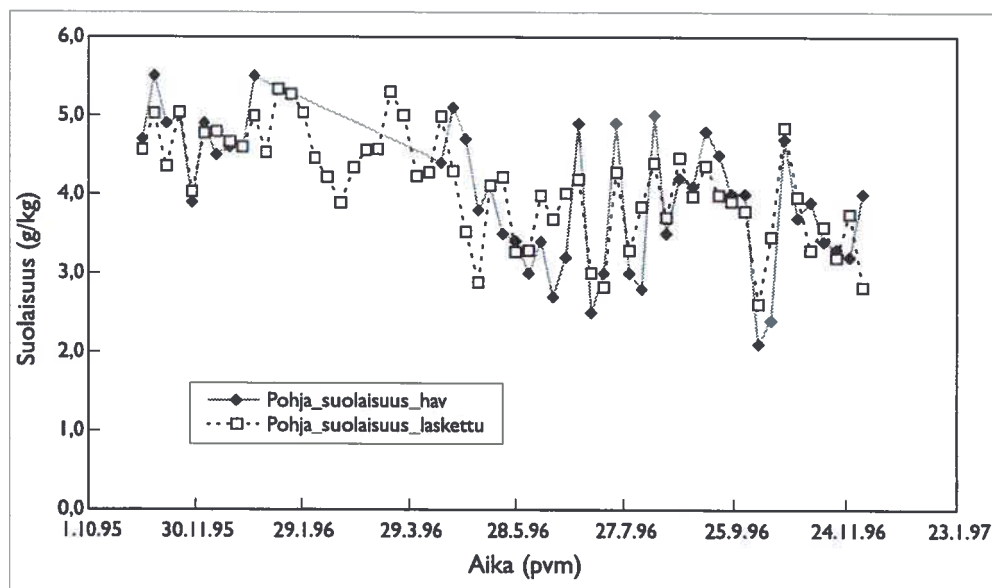
Kuva 37. Meriveden lämpötila Tammisaaren länsisalmissa (3h-keskiarvo) 1,5 m ja 4,5 m 25.10. 1995–8.12.1996.

## Suolaisuus

Virtausmittareilla mitatusta lämpötilasta ja sähkönjohtavuudesta lasketut suolaisuusarvot (kolmen tunnin keskiarvoja) ja vesinäytteistä suoraan määritetyt suolaisuusarvot jaksolle 1.7.–15.10.1996 on esitetty kuvassa 38. Kuvassa 39 on esitetty jaksolle 25.10.1995–8.12.1996 vastaavat viikkokeskiarvot ainoastaan pohjanläheiselle kerrokselle. Sähkönjohtavuuden ja lämpötilan perusteella määritettyä suolaisuutta verrattiin vesinäytteistä määritettyyn suolaisuuteen. Yhtäpitävyys oli kohtalaisen hyvä. Eroja aiheuttaa sekä lämpötila- ja sähkönjohtokykyanturin että muunnoskaavojen tarkkuus. Toisaalta lämpötila- ja sähkönjohtokykyarvojen perusteella lasketun suolaisuuden keskiarvoistamisesta johtuva lyhytaikaisen vaihtelun tasoittuminen on aiheuttanut eroja vesinäytteistä määritettyihin hetkellisiin suolaisuusarvoihin nähden.

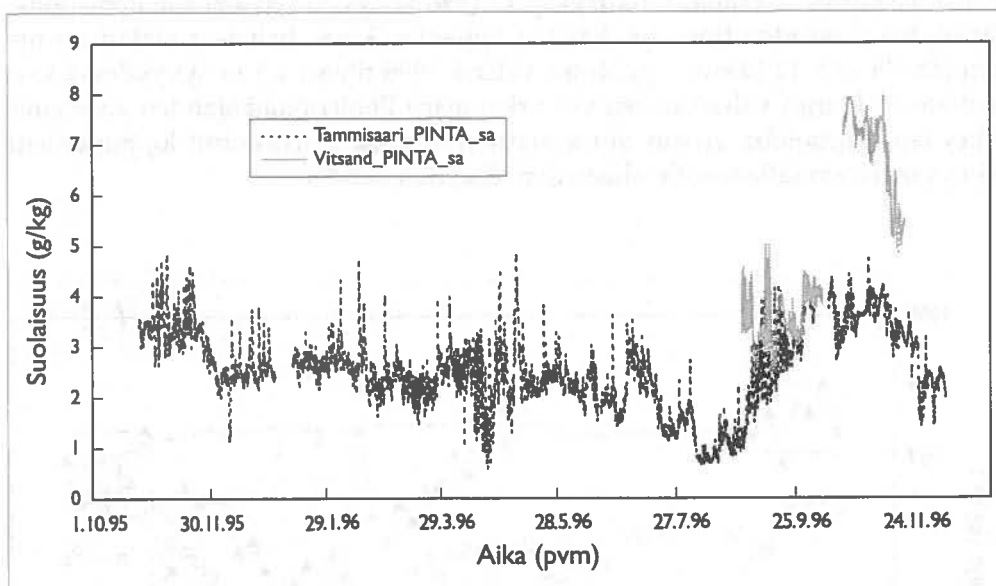


Kuva 38. Tammisaaren sillalla virtausmittareilla 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä mitatun johtokyvyn perusteella laskettu suolaisuus (kolmen tunnin keskiarvoja) ja Vitsten'iltä (p12) 1 m ja 5 m syvyydeltä otetuista vesinäytteistä analysoitu suolaisuus jaksolla 1.7.–15.10.1996.

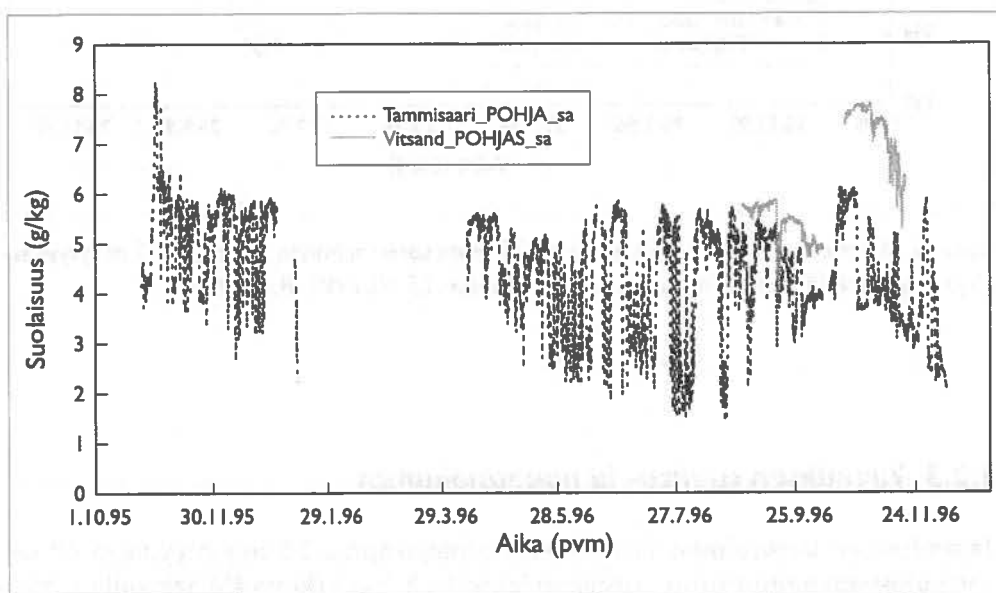


Kuva 39. Tammisaaren länsisalmessa (4,5 m syvyydestä) 25.10.1995–8.12.1996 johtokyvyn perusteella laskettu suolaisuus (viikkokeskiarvot) ja Vitstenin (p12) vesinäytteistä (5 m syvyydestä) määritetty suolaisuus ( $R^2 = 0,55$ ). Johtokiky-anturi oli rikki 1.1.–10.4.1996.

Suolaisuus Tammisaaren salmissa 1,5 metrin syvyydessä vaihteli 1–5 g kg<sup>-1</sup> ja 4,5 metrin syvyydessä 2–6 g kg<sup>-1</sup> välillä (kuvat 40 ja 41). 4,5 m syvyydessä suolaisuus vaihteli virtausten vaikutuksesta nopeasti ja enemmän kuin 1,5 m syvyydessä. Virtaussuunnasta riippuen suolaisempi tai vähäsuolaisempi vesi täytti salmen pohjanläheisen vesikerroksen. Syksyllä 1996 lokakuun puoleenväliin asti Vitsandin suolaisuus oli lähes sama kuin Tammisaaren salmissa vastaavilla mittaussyvyyksillä. Lokakuun puolivälissä mitta-anturin vaihdoksen jälkeen suolaisuus Vitsandissa 1,5 m ja 8 m syvyydessä nousi äkillisesti yli 6 g kg<sup>-1</sup>. Ajoittain suolaisuus oli jopa yli 7 g kg<sup>-1</sup>. Epätavallisen korkea suolaisuus saattoi johtua mittaus-teknisestä virheestä. Suolaisuus Tammisaareissa 1,5 m syvyydessä pysyi vastaväna aikana vakaana, mutta 4,5 m syvyydessä suolaisuus nousi lähelle 6 g kg<sup>-1</sup>. Samaan aikaan virtaus Tammisaareissa 4,5 m syvyydessä kääntyi 10 vuorokaudeksi sisään päin. Marraskuussa suolaisuus alkoi laskea kaikissa mittauspisteissä.



Kuva 40. Suolaisuus Tammisaaren länsisalmissa ja Vitsandin salmissa (3h-keskiarvo) 1,5 m syvyydessä 25.10.–8.12.1996.



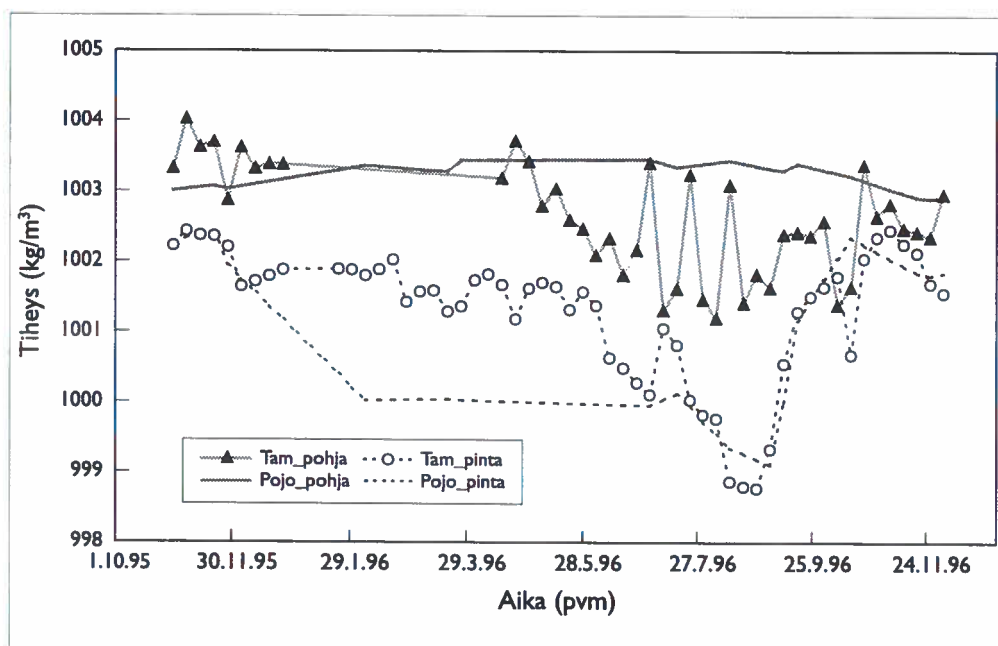
Kuva 41. Suolaisuus Tammisaaren länsisalmissa 4,5 m ja Vitsandin salmissa 8 m syvyydessä (3h-keskiarvo) 25.10.–8.12.1996.



## Tiheys

Veden lämpötilan ja suolaisuuden perusteella laskettu tiheys Tammisaaren salmissa indikoi sisään virtaavan meriveden kykyä painua Pohjanpitäjänlahden alusveteen uusimaan ehtyvää happivarastoa. Kun sisään virtaavan veden tiheys on suurempi kuin alusveden, syrjäyttää tuleva vesi tilavuuttaan vastaavan määrän alusvettä. Tammisaaren salmissa 1,5 m syvyydessä tiheys oli koko mittausjakson selvästi alhaisempi kuin Pohjanpitäjänlahden alusvedessä ja vaihteli välillä 999–1002,5 kg m<sup>-3</sup> (kuva 42). Talvea lukuun ottamatta tiheys oli Tammisaaren salmissa 1,5 m syvyydessä hyvin lähellä Pohjanpitäjänlahden päällysveden tiheyttä. Talvella tiheys Tammisaaren salmissa 1,5 m syvyydessä oli selvästi Pohjanpitäjänlahden päällysveden tiheyttä suurempi.

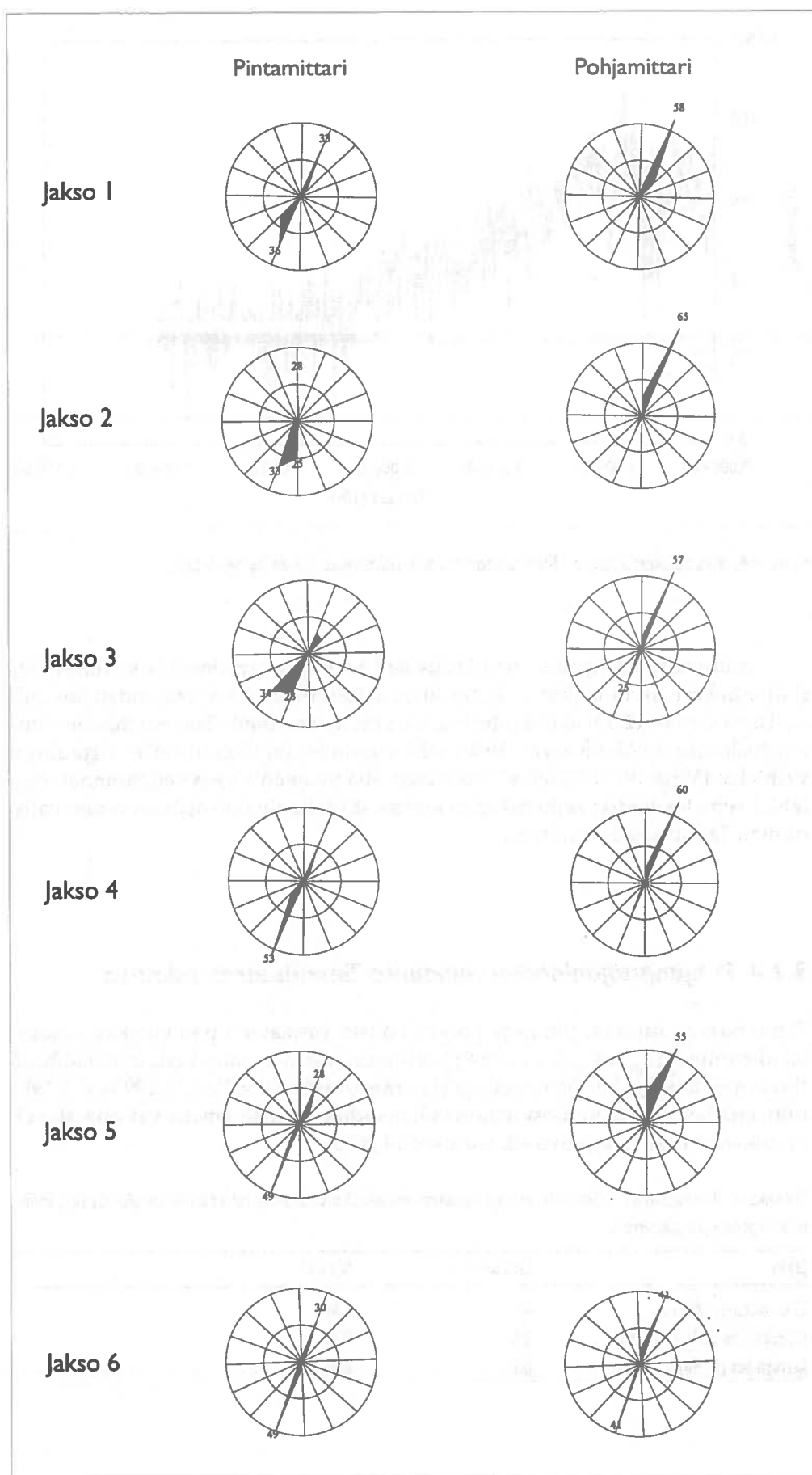
Tiheys 4,5 m syvyydessä Tammisaaren salmissa vaihteli välillä 1001,5–1004 kg m<sup>-3</sup> ja oli lokakuusta 1995 alkutalveen 1996 korkeampi kuin Pohjanpitäjänlahden alusvedessä. Kesällä ja alkusyksystä 1996 tiheys oli selvästi alle Pohjanpitäjänlahden alusveden tiheyden käyden kuitenkin kesä-, heinä- ja elokuussa hyvin lähellä sitä. Lokakuun puolessa välissä 1996 tiheys 4,5 m syvyydessä kävi seuraavan kerran väliaikaisesti (10 vrk:n ajan) Pohjanpitäjänlahden alusveden tiheyden yläpuolella. Aivan mittausjakson lopussa marraskuun loppupuolella tiheys nousi samalle tasolle alusveden tiheyden kanssa.



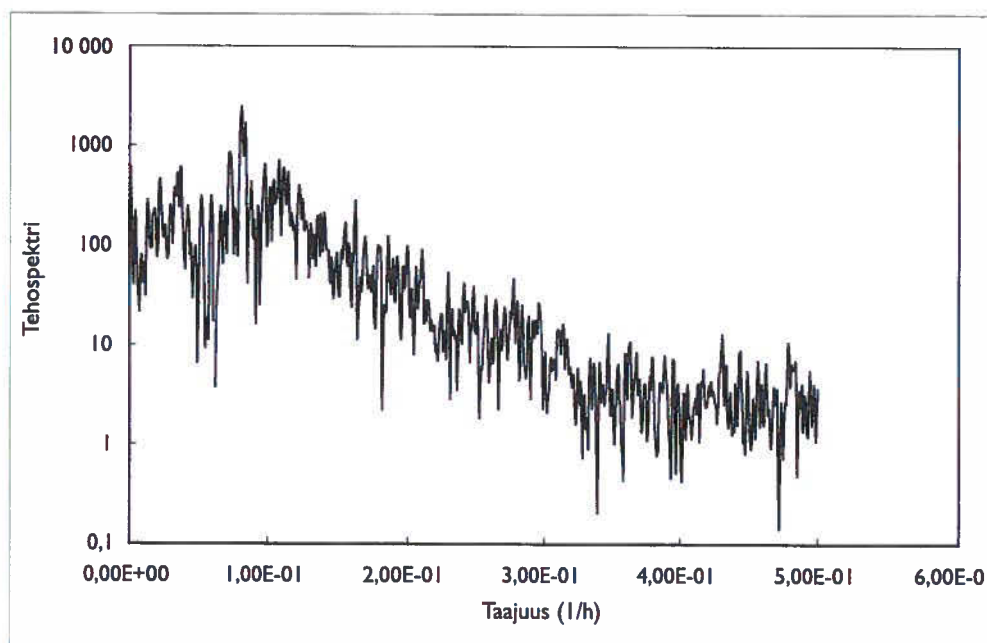
Kuva 42. Meriveden tiheys (viikkokeskiarvo) Tammisaaren salmissa 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä ja Pohjanpitäjänlahden alusvedessä keskimäärin 25.10.1995–8.12.1996.

### 3.2.3 Virtauksen suunta- ja nopeusjakumat

Tammisaaren länsisalmen virtauksen suuntajakauma 1,5 m syvyydessä oli selvästi ulospäin painottunut erityisesti jaksoilla 2, 3 ja 4 (kuva 43). Jaksoilla 1, 5 ja 6 virtaus oli tasaisemmin jakautunut sisään- ja ulosvirtaukseen. Syvyydessä 4,5 m virtaus oli selvästi painottunut sisäänpäin. Jaksoilla 3 ja 6 oli myös ulosvirtausta.



Kuva 43. Virtauksen suuntajakaumat Tammisaaren länsisalnessa mittausjaksoittain (ks. taulukko 4).



Kuva 44. Virtauksen spektri Tammisaaren länsisalmissa 1,5 m syvyydessä.

Tammisaaren länsisalmen virtaukselle 1,5 metrin syvyydessä laskettiin spektri tunnin keskiarvoilla (kuva 44). Spektrin maksimi oli  $0,08 \text{ h}^{-1}$  taajuuden kohdalla. Tämä vastaa 12,5 h aallonpituutta, joka on hyvin lähellä Suomenlahden ominaisheilahtelua (Alenius ym. 1998) sekä vuorovesi-ilmiöön liittyvää virtauksen vaihtelua (Virta 1978). Tämä viittaa siihen, että Suomenlahden vedenpinnan heilahtelu em. tekijöiden vaikutuksesta saattaa säädellä ainakin osittain veden vaihduntaa Tammisaaren salmissa.

### 3.2.4 Pohjanpitäjänlahden vaihdunta Tammisaaren salmissa

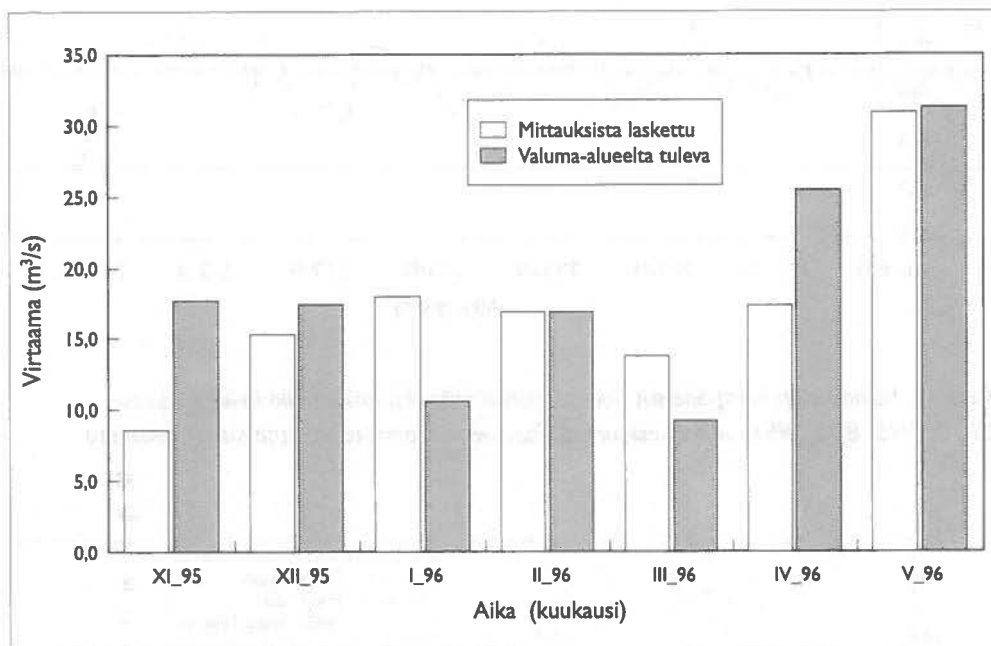
Tammisaaren salmien pinta- ja pohjavirtausta vastaavien poikkileikkausalojen jakokertoimet ( $k_{pi}$  ja  $k_{pov}$ , ks. kuva 8) ja virtausnopeuden painokertoimet kalibroitiin jääpeitteiselle, kerrostuneelle ja ei kerrostuneelle jaksolle 1.11.1995–30.5.1996 niin, että laskettu nettoulosvirtaama oli mahdollisimman lähellä valuma-alueelta tulevaa virtaamaa (kuva 45, taulukot 14 ja 15)

Taulukko 14. Tammisaaren salmien pintavirtausta vastaavan poikkileikkausalan osuus koko poikkileikkauksesta ( $k_p$ ) kalibroinnin perusteella jaksoittain.

Jakso	Länsisalmi	Itäsalmi
Ei kerrostunut (XI_95)	0,9	0,85
Jääpeitteinen (XII_95-IV_96)	0,8	0,75
Kerrostunut (V_96)	0,9	0,85

Taulukko 15. Tammisaaren salmien pinta- ja pohjavirtauksia vastaavat poikkileikkausalat ( $m^2$ ) sekä virtausnopeuden painokertoimet  $\beta_{pi}$  ja  $\beta_{po}$  kalibroinnin perusteella jaksoittain.

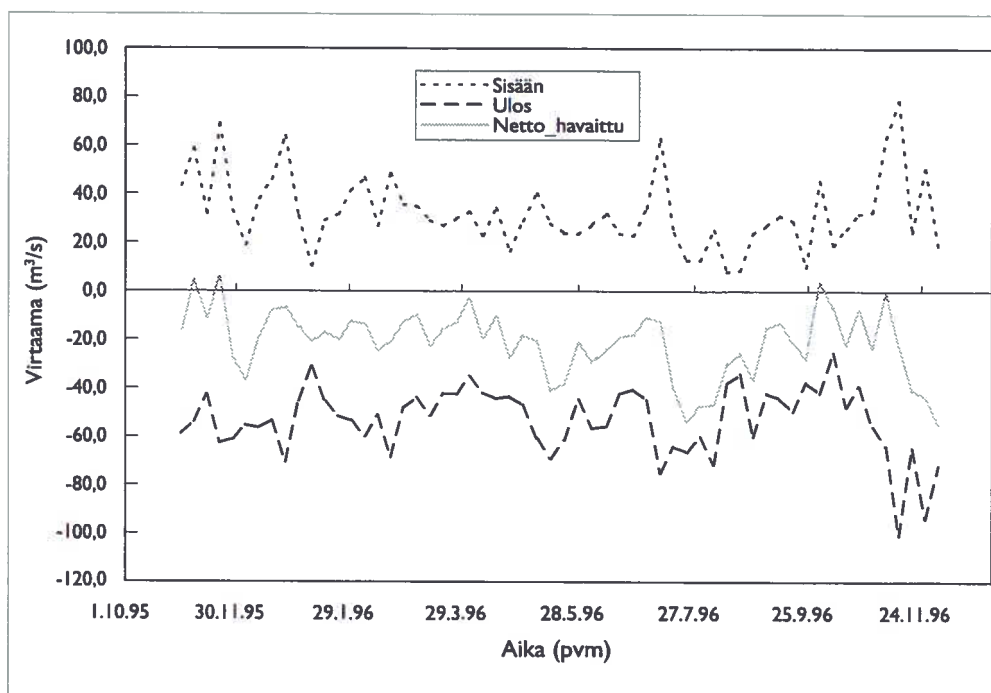
Jakso	Länsisalmi		Itäsalmi	
	Pinta	Pohja	Pinta	Pohja
Ei kerrostunut (XI_95)	476 / 1	84 / 0,8	276 / 1	49 / 0,8
Jääpeitteinen (XII_95-IV_96)	420 / 1	140 / 0,8	244 / 1	81 / 0,8
Kerrostunut (V_96)	476 / 1	84 / 0,8	276 / 1	49 / 0,8



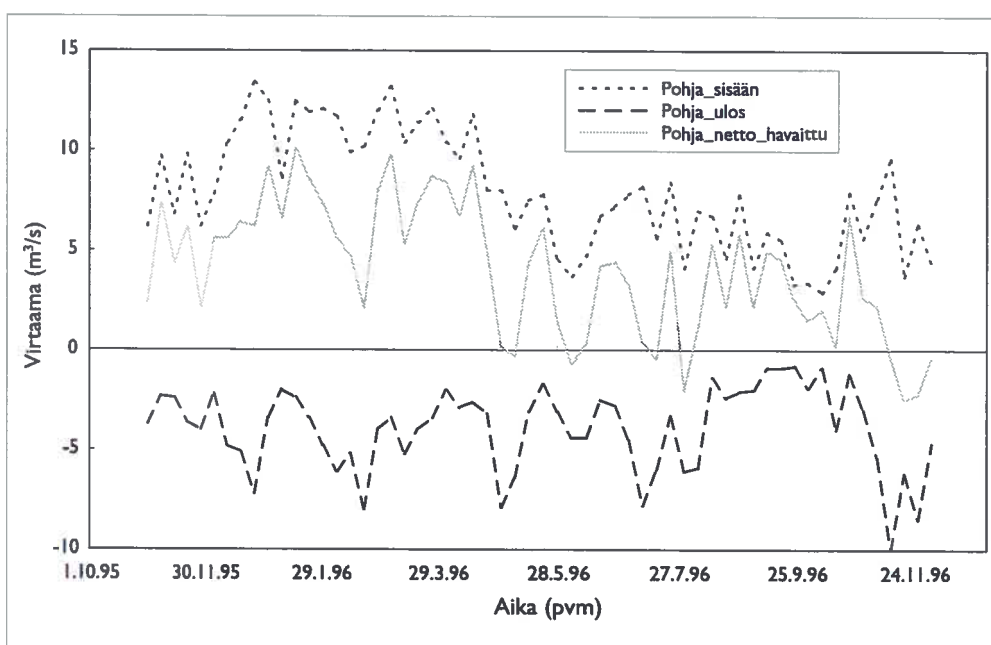
Kuva 45. Tammisaaren salmien lasketun ja havaitun nettovirtaaman kuukausikeskiarvot 1.11.1995–31.5.1996; virtauspinta-alan jakokertoimien ja virtausnopeuden painotuskertoimien kalibrointi.

Tammisaaren salmissa vaihdunnan viikkokeskiarvot laskettiin jaksolle 25.10.1995–8.12.1996 käyttäen kalibroituja jako- ja painotuskertoimia. Koko poikkileikkauksen nettovirtaama vaihteli  $+10$ – $(-50)$  (kuva 46; negatiivinen arvo tarkoittaa virtausta ulospäin). Vesi virtasi pääasiassa ulospäin, ja virtaaman keskiarvo oli  $-21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Syksyisin virtaus kääntyi hetkittäin sisäänpäin. Tammisaaren salmien pohjanläheisessä kerroksessa virtaama suuntautui lähes jatkuvasti sisäänpäin ja sen keskiarvo oli  $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (kuva 47). Syksyllä ja talvella sisäänvirtaus oli runsaampaa, kesällä vähäisempää.

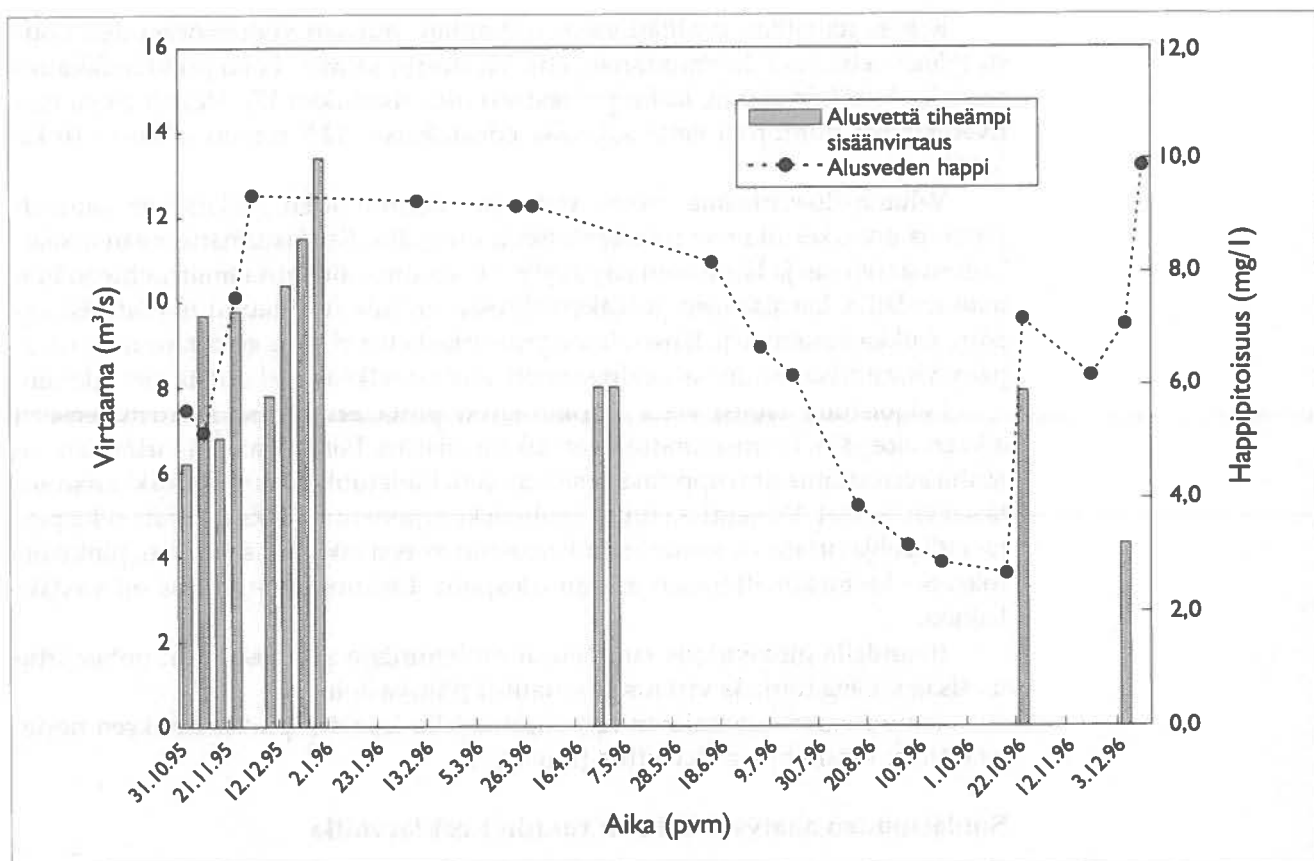
Tammisaassa virtaavan veden ja Pohjanpitäjänlahden alusveden tiheystietojen perusteella (kuva 42) voitiin pohjanläheisessä kerroksessa virtaavasta vedestä erottaa se osuus, joka alusvettä raskaampana syrjäyttää syvänteen veden ja uudistaa syvänteen happivaroja (kuva 48). Vuosien 1995 ja 1996 lokakuun puolessavälissä alkanut happipitoisuuden nousu alusvedessä ajoittuu samaan aikaan alusvettä tiheimmän veden sisäänvirtauksen kanssa.



Kuva 46. Vaihduksen komponentit Tammisaaren salmien koko poikkileikkauksessa 25.10.1995–8.12.1996; viikkokeskiarvot. Positiivinen arvo tarkoittaa sisäänvirtausta.



Kuva 47. Vaihduksen komponentit Tammisaaren salmien pohjanläheisessä poikkileikkauksessa 25.10.1995–8.12.1996; viikkokeskiarvot. Positiivinen arvo tarkoittaa sisäänvirtausta.



Kuva 48. Alusvettä tiheämmän meriveden nettosisäänvirtaus pohjanläheisessä kerroksessa ja alusveden keskimääräisen happipitoisuuden vaihtelu Pohjanpitäjänlahdella 25.10.1995–8.12.1996. 1.1.–1.5. ei havaintoja tiheydestä.

### 3.2.5 Tilastolliset riippuvuudet

#### Virtausnopeuden analyysi kolmen tunnin keskiarvoilla

Tammisaaren ja Vitsandin salmien suuntaisen virtausnopeuden ja suolaisuuden kolmen tunnin keskiarvojen sekä niitä selittävien tuulen pohjois- ja eteläkomponenttien, vedenkorkeusmuutosten (kolmen tunnin aikana) ja valuma-aluevirtaaman välille muodostettiin regressiomallit mittauspisteittäin kerrostumisen ja jääpeitteen mukaan kolmessa eri jaksossa (luku 2.5.2). Selittäviä muuttujia viivytettiin 0–15 tuntia.

Tammisaaren salmissa vedenkorkeuden muutos oli merkitsevin virtausta selittävä muuttuja (taulukko 16). Valuma-aluevirtaama oli seuraavaksi merkitsevin ennen tuulta, jonka vaikutus Tammisaaren salmissa jäi yllättävän pieneksi. Regressiomallien selitysasteet vaihtelivat välillä 0,56–0,77. Vitsandin salmissa tuulen merkitys virtausta selittävänä tekijänä oli selvästi suurempi kuin Tammisaareissa. Selitysasteet vaihtelivat välillä 0,38–0,84.

Tammisaaren salmien pintamittareiden regressioyhtälöissä vakiotermi olivat negatiivisia ja pohjamittarin positiivisia. Tämä osoitti, että Tammisaaren salmissa oli jatkuvaluotoinen estuaari-kierto ts. virtaus suuntautuu pinnalla ulospäin ja pohjalla sisäänpäin. Vitsandissa vastaavaa kiertoa ei ollut havaittavissa. Tämä saattoi johtua mittauspisteiden epäedullisesta sijainnista.



Regressiomallien kvalitatiivisen tulkinnan mukaan vedenkorkeuden nousu työnsi vettä sekä Tammisaareen että Vitsandin salmen koko poikkileikkauksessa keskimäärin sisään, lasku puolestaan ulos (taulukko 17). Heilahteleva merivedenpinta pumppasi vettä salmissa edestakaisin 12,5 tunnin jaksossa (luku 3.2.3).

Valuma-aluevirtaama työnsi virtausta Tammisaaren molempien salmien pinta- ja pohjakerroksessa pääsääntöisesti ulospäin. Kerrostumattomaan aikaan Tammisaaren itä- ja länsisalmen käyttäytyivät valuma-aluevirtaaman suhteen hie- man eri lailla. Länsisalmen pohjakerroksessa virtaus suuntautui lievästi sisään- päin, vaikka itäsalmen ja länsisalmen yhteenlaskettu virtaus suuntautui ulos- päin. Vitsandissa valuma-aluevirtaamalla ei ollut selkeää vaikutusta virtaukseen.

Pohjoistuuli työnsi vettä Tammisaaren pintakerroksessa kerrostuneeseen aikaan ulospäin, kerrostumattomaan aikaan sisään. Pohjan lähellä virtaus suun- tautui kerrostumisesta riippumatta sisäänpäin. Etelätuuli aiheutti vastakkaissuun- taiset virtaukset. Vitsandissa tuulen pohjoiskomponentin vaikutuksesta sekä pin- ta- että pohjavirtaus suuntautuivat kerrostuneeseen aikaan sisäänpäin, pintaker- roksessa kerrostumattomaan aikaan ulospäin. Etelätuulella virtaus oli vastak- kainen.

Itätuulella pintavirtaus suuntautui molemmissa salmissa ulos, pohjavirta- us sisään. Länsituulella virtaus suuntautui päinvastoin.

Tammisaaren länsisalmen regressiomallilla laskettu pintavirtauksen nope- us seurasi varsin hyvin havaittua (kuva 49).

### **Suolaisuuden analyysi kolmen tunnin keskiarvoilla**

Sekä Tammisaaren että Vitsandin salmissa tuuli oli merkittävin suolaisuuden vaihtelun selittäjä. Vedenkorkeusvaihtelu ja valuma-aluevirtaama olivat vähem- män merkittäviä. Suolaisuuden regressiomallien selitysasteet ( $R^2$ ) vaihtelivat välillä 0,01–0,5 (taulukko 16). Huonoimmat selitysasteet saatiin jääpeitteiselle ajalle, jolloin oli vähiten havaintoja. Parhaimmat selitysasteet saatiin Vitsandissa 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä sekä Tammisaaressa 4,5 m syvyydessä.

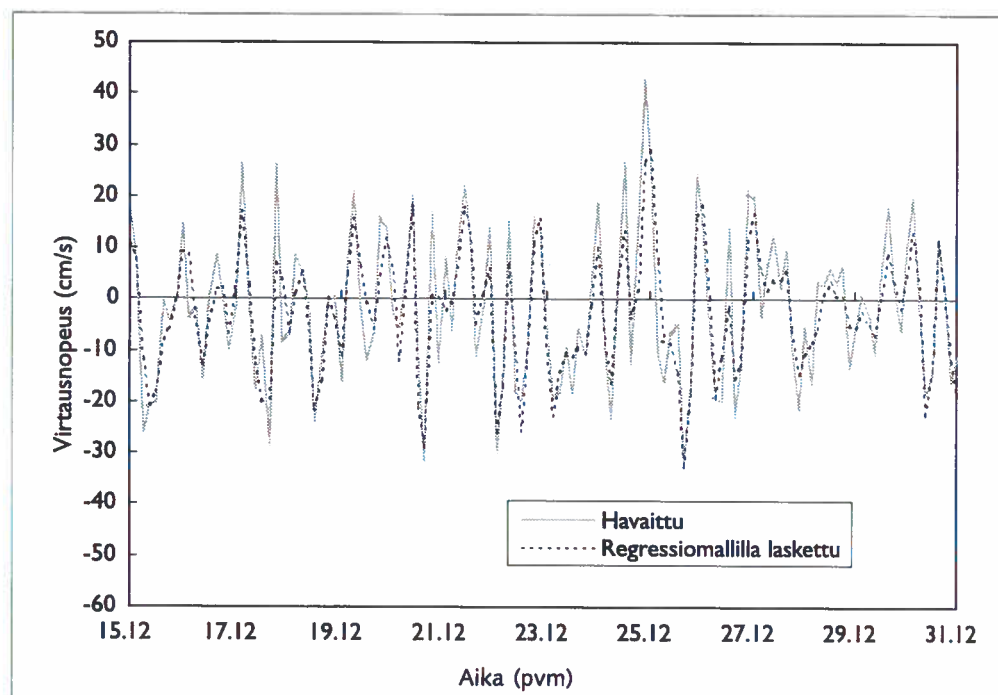
Valuma-aluevirtaamalla ei ollut havaittavaa vaikutusta regressiomalleilla laskettuun suolaisuuteen (taulukko 17). Myös vedenkorkeuden muutoksilla oli vain vähäinen vaikutus suolaisuuteen Tammisaaren salmissa. Vitsandissa ve- denpinnan nousu nosti suolaisuutta muuten paitsi kerrostuneeseen aikaan pin- takerroksessa.

Tuulen vaikutus vaihteli paljon kerrostumistilanteen ja havaintopisteen mukaan. Pohjoistuulella kerrostuneeseen aikaan suolaisuus molempien salmien pintakerroksissa laski. Kerrostumattomaan aikaan Tammisaaren pintakerroksessa pohjoistuulella ei ollut suolaisuuteen vaikutusta, mutta Vitsandissa se laimensi suolaisuutta. Tammisaaren salmien pohjakerroksessa suolaisuus nousi pohjois- tuulella kerrostuneeseen aikaan, mutta laski kerrostumattomaan aikaan. Vitsan- din salmen pohjakerroksessa pohjoistuulella oli tilanne kerrostumiseen suhteen päinvastainen. Etelätuulen vaikutus suolaisuuteen oli päinvastainen pohjoistuul- len vaikutukseen verrattuna.

Itätuulella oli suolaisuutta nostava vaikutus kerrostuneeseen aikaan Tam- misaaren salmen pintakerroksessa. Kerrostumattomaan aikaan itätuuli laski suo- laisuutta molempien salmien pintakerroksessa ja Vitsandin pohjakerroksessa. Länsituulen vaikutus oli vastakkainen.

Taulukko 16. Tammisaaren ja Vitsandin virtausten ja suolaisuuden regressiomallit - riippuvuus tuulesta, vedenkorkeusmuutoksista ja valuma-aluevirtaamasta (3h-keskiarvot).  $V$  = virtausnopeuden kolmen tunnin keskiarvo ( $\text{cm s}^{-1}$ ),  $W$  = vedenkorkeuden muutos kolmentunnin aikana 0–15 tunnin viiveellä,  $Q_{\text{VAL}}$  = virtaama valuma-alueelta ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ),  $S$  = suolaisuus ( $\text{g kg}^{-1}$ ),  $N$  = tuulen pohjoiskomponentin kolmen tunnin keskiarvo 0–15 tunnin viiveellä ja  $E$  = tuulen itäkomponentin kolmen tunnin keskiarvo 0–15 tunnin viiveellä.  $R^2$  selitysaste.

Paikka	Jakso	Yhtälö	$R^2$
Tammisaari, länsisalmi syv 1,5 m	kerrostumaton	$V = 1,629 \times W_0 + 1,760 \times W_3 - 0,737 \times W_6 - 0,098 \times Q_{\text{VAL}} - 0,750 \times N_3 + 0,564 \times N_6 + 0,191 \times N_{15} - 0,181 \times W_9 - 0,076 \times E_0 - 0,341$	0,67
	jääpeitteinen	$V = 2,497 \times W_0 + 1,582 \times W_3 - 0,727 \times W_6 - 0,227 \times W_9 - 0,034 \times Q_{\text{VAL}} - 2,096$	0,69
	kerrostunut	$V = 2,279 \times W_3 + 0,878 \times W_0 - 0,135 \times Q_{\text{VAL}} - 0,378 \times W_6 + 0,154 \times W_{15} + 0,522 \times E_6 - 0,538 \times E_3 - 0,176 \times W_9 - 0,088 \times N_3 - 0,475$	0,71
Tammisaari, länsisalmi syv 4,5m	kerrostumaton	$V = 0,781 \times W_0 + 0,558 \times W_3 - 0,317 \times W_6 + 0,101 \times E_{15} + 0,043 \times Q_{\text{VAL}} + 0,242 \times N_{15} - 0,720 \times N_3 + 0,371 \times N_0 + 0,489 \times N_6 + 1,868$	0,44
	jääpeitteinen	$V = 1,401 \times W_0 + 1,087 \times W_3 - 0,144 \times Q_{\text{VAL}} + 0,069 \times E_{15} + 0,087 \times W_{12} + 7,185$	0,56
	kerrostunut	$V = 1,241 \times W_3 + 0,413 \times W_0 - 0,163 \times Q_{\text{VAL}} + 0,353 \times N_0 + 0,219 \times N_{15} + 0,656 \times E_6 - 0,301 \times E_0 - 0,288 \times W_6 + 0,191 \times W_{15} + 0,589 \times N_{12} + 0,393 \times N_6 + 9,730$	0,63
Tammisaari, itäsalmi syv 1,5m	kerrostumaton	$V = 1,563 \times W_0 + 1,572 \times W_3 - 0,449 \times W_6 - 0,082 \times Q_{\text{VAL}} - 2,514$	0,62
	jääpeitteinen	$V = 2,160 \times W_0 + 2,138 \times W_3 - 0,911 \times W_6 - 0,458 \times W_9 - 0,059 \times Q_{\text{VAL}} + 0,334 \times N_0 - 0,287 \times N_3 - 3,533$	0,65
	kerrostunut	$V = 2,581 \times W_3 - 0,1045 \times W_0 - 0,973 \times W_6 - 0,171 \times Q_{\text{VAL}} - 0,161 \times E_0 + 0,261 \times W_9 + 0,207 \times W_{15} + 0,609$	0,77
Tammisaari, itäsalmi syv 4,5m	kerrostumaton	$V = 1,404 \times W_3 + 0,553 \times W_0 - 0,345 \times Q_{\text{VAL}} + 0,412 \times N_6 + 9,952$	0,58
	jääpeitteinen	$V = 0,559 \times N_{12} + 0,941 \times W_3 + 0,554 \times W_0 + 0,250 \times N_0 - 0,041 \times Q_{\text{VAL}} + 0,350 \times W_{12} + 0,106 \times E_6 + 3,103$	0,66
	kerrostunut	$V = 1,412 \times W_3 + 0,371 \times N_{12} - 0,640 \times W_6 + 0,375 \times W_0 + 0,246 \times N_{15} + 0,185 \times W_9 - 0,096 \times Q_{\text{VAL}} + 0,082 \times E_{15} + 0,170 \times N_6 + 3,078$	0,61
Vitsand, syv 1,5m	kerrostumaton	$V = -0,193 \times N_0 + 0,793 \times W_3 - 0,221 \times E_6 + 0,658 \times W_0 + 0,212 \times W_{12} - 0,183 \times N_9 - 0,145 \times W_9 - 0,147 \times E_{12} - 4,465$	0,69
	jääpeitteinen	ei mallia	–
	kerrostunut	$V = 1,732 \times W_3 - 1,286 \times E_3 + 1,020 \times W_0 + 0,558 \times N_6 + 0,470 \times E_{15} + 4,50$	0,84
Vitsand, syv 7,5 m	kerrostumaton	$V = 0,295 \times W_0 - 0,156 \times W_9 - 0,171 \times W_{15} + 0,199 \times W_3 + 0,144 \times E_0 - 0,156 \times W_6 - 1,30$	0,38
	jääpeitteinen	ei mallia	–
	kerrostunut	$V = 0,194 \times N_6 + 0,173 \times W_0 - 0,171$	0,51
Tammisaari, itäsalmi syv 1,5 m	kerrostumaton	$S = -0,048 \times E_{15} - 0,028 \times E_0 + 0,038 \times W_3 + 3,470$	0,43
	jääpeitteinen	$S = -0,070 \times W_{15} + 2,805$	0,03
	kerrostunut	$S = -0,044 \times N_3 + 0,026 \times E_0 - 0,021 \times N_9 + 0,017 \times W_3 + 2,545$	0,10
Tammisaari, itäsalmi syv 4,5 m	kerrostumaton	$S = -0,080 \times N_0 + 3,475$	0,31
	jääpeitteinen	ei mallia	–
	kerrostunut	$S = 0,081 \times N_{15} - 0,052 \times W_0 + 0,038 \times W_{12} + 0,024 \times N_9 + 3,290$	0,27
Vitsand, syv 1,5 m	kerrostumaton	$S = -0,028 \times N_6 - 0,043 \times E_9 + 0,0298 \times W_6 + 0,032 \times W_3 + 0,031 \times W_{15} + 0,036 \times W_9 + 0,017 \times E_{15} + 3,539$	0,40
	jääpeitteinen	ei mallia	–
	kerrostunut	$S = -0,157 \times W_0 - 0,123 \times N_0 + 3,007$	0,50
Vitsand, syv 7,5 m	kerrostumaton	$S = 0,019 \times N_0 + 0,024 \times W_6 - 0,009 \times E_0 + 0,016 \times W_{12} + 5,435$	0,11
	jääpeitteinen	ei mallia	–
	kerrostunut	$S = -0,134 \times N_0 + 0,130 \times W_{12} + 4,721$	0,40



Kuva 49. Havaittujen ja regressiomalleilla laskettujen pintavirtauksien (nopeuksien aikasarjat; 1,5 m syvyydessä) vertailu Tammisaaren länsisalmissa (15.–31.12.1995). Positiivinen arvo tarkoittaa sisäänvirtausta.

Taulukko 17. Kvalitatiivinen tarkastelu regressioyhtälöiden (kolmen tunnin keskiarvot, taulukko 16) perusteella valuma-aluevirtaaman, vedenkorkeusmuutoksen ja tuulen vaikutuksesta virtaukseen ja suolaisuuteen Tammisaaren länsisalmissa ja Vitsandin salmissa. I = kerrostunut jakso, II = kerrostumaton jakso ja III = jääpeitteinen jakso. Qval = valuma-aluevirtaama, dW(+) = vedenpinnan nousu, N = tuulen pohjoisen suuntainen komponentti ja E = tuulen idän suuntainen komponentti. + = virtausta sisäänpäin työntävä vaikutus, - = virtausta ulospäin työntävä vaikutus ja 0 = ei havaittavaa vaikutusta.

Muuttuja	Mittauspaikka ja jakso						Vitsand					
	Tammisaari			Pohja			Pinta			Pohja		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
a) Vaikutukset virtaukseen												
Qval	-	-	-	-	(+)	-	0	0	0	0	0	0
dW (+)	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	0
N	-	+	0	+	+	0	+	-	0	+	0	0
E	-	-	0	+	+	+	-	-	0	0	+	0
b) Vaikutukset suolaisuuteen												
Qval	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dW (+)	+	+	0	-	0	0	-	+	0	+	+	0
N	-	0	0	+	-	0	-	-	0	-	+	0
E	+	-	0	0	0	0	0	-	0	0	-	0

Tammisaaren itäsalmen virtausta länsisalmen virtauksella selittävien regressiomallien selitysasteet ( $R^2$ ) vaihtelivat 0,04–0,88 (taulukko 18). Selitysasteet olivat varsin hyviä lukuun ottamatta pintamittarin mallia vähiten mittahavaintoja sisältävällä, kerrostuneella jaksolla.

Taulukko 18. Tammisaaren itäsalmen virtauksen regressiomalli -riippuvuus länsisalmen virtauksesta (3h-keskiarvot).  $V_{EPI}$  = virtaus itäsalmen pintakerroksessa;  $V_{EPO}$  = virtaus itäsalmen pohjakerroksessa;  $V_{WPI}$  = virtaus länsisalmen pintakerroksessa;  $V_{WPO}$  = virtaus länsisalmen pohjakerroksessa.

Jakso	Yhtälö	R <sup>2</sup>
kerrostumaton	$V_{EPI} = 0,89 \times V_{WPI} + 0,10 \times V_{WPO} - 2,48$	0,85
	$V_{EPO} = 0,27 \times V_{WPI} + 0,59 \times V_{WPO} - 1,83$	0,86
jääpeitteinen	$V_{EPI} = 0,98 \times V_{WPI} + 0,05 \times V_{WPO} - 2,14$	0,88
	$V_{EPO} = 0,15 \times V_{WPI} + 0,59 \times V_{WPO} - 0,08$	0,82
kerrostunut	$V_{EPI} = 0,33 \times V_{WPI} + 1,72$	0,04
	$V_{EPO} = 0,28 \times V_{WPI} + 0,46 \times V_{WPO}$	0,75

### Virtaaman analyysi viikkokeskiarvoilla

Regressioanalyysi suoritettiin myös Tammisaaren salmen virtaaman ja suolaisuuden viikkokeskiarvoille koko salmen poikkileikkauksessa ja pohjanläheisessä kerroksessa. Virtaamat laskettiin virtausnopeuksien kolmen tunnin keskiarvojen perusteella aiemmin tässä luvussa vaihdunnan laskemisen yhteydessä kuvatulla tavalla. Virtaama jaoteltiin nettovirtaamaan, sisäänvirtaukseen ja ulosvirtaukseen. Nettovirtaama on jakson kaikkien havaintojen aritmeettinen keskiarvo. Brutto sisään- ja ulosvirtaus ovat vastaavan suuntaisten havaintojen aika-keskiarvoja.

Selittäviä muuttujia, vedenkorkeutta ja sen muutosta (tuntiarvoista laskettu viikko-keskiarvo) sekä valuma-aluevirtaamaa (päiväarvoista laskettu viikko-keskiarvo) viivytettiin 0–1 viikkoa. Aineiston jakoa kerrostumisen suhteen ei tehty keskiarvoistamisesta johtuvan havaintolukumäärän pienenemisen vuoksi.

Vedenkorkeus jaettiin neljään komponenttiin, jotka olivat:

- vedenkorkeuden keskiarvo
- vedenkorkeuden netto muutos viikon aikana
- vedenkorkeuden brutto nousu viikon aikana (nousevien havaintojen summa)
- vedenkorkeuden brutto lasku viikon aikana (laskevien havaintojen summa)

Tammisaaren salmien kokonaisvirtaaman selitysaste ( $R^2$ ) oli valuma-aluevirtaaman ja vedenkorkeusmuutosten avulla 0,74 (taulukko 19). Pohjanläheisen kerroksen virtauksen selitysaste ( $R^2$ ) oli heikompi, 0,28. Pohjanläheisen vesikerroksen (4,5 m syvyydessä) suolaisuuden selitysaste ( $R^2$ ) virtaamakomponenttien ja vedenkorkeusmuutosten avulla oli 0,39–0,55. Regressiomalleilla lasketut ja havaitut virtaamat ja suolaisuudet olivat lähellä toisiaan (kuvat 50–52).

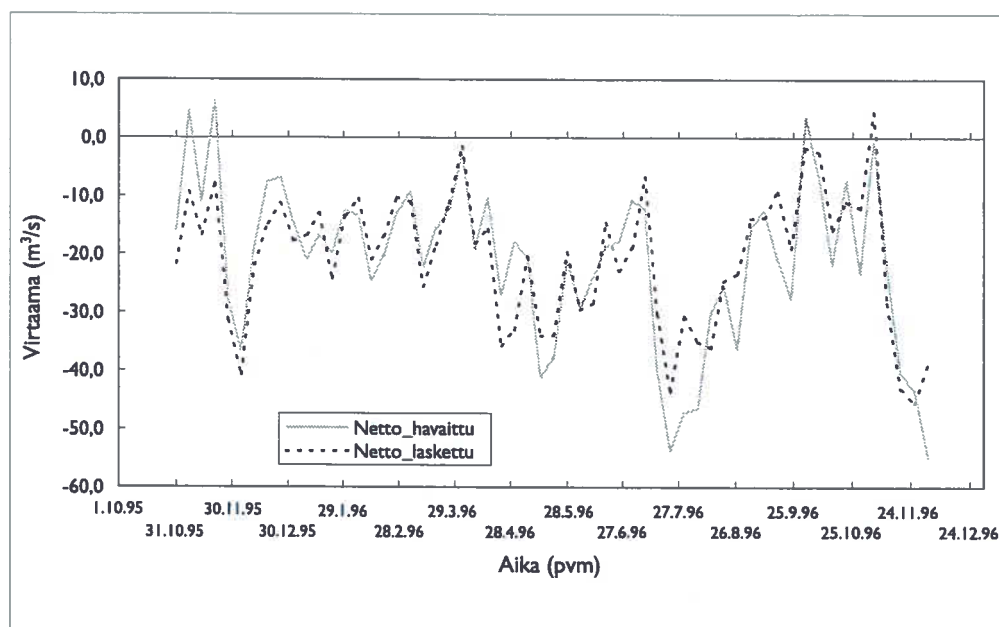
Regressiomallien perusteella laskettu nettovirtaama koko poikkileikkauksessa kääntyi ulospäin valuma-aluevirtaaman ja vedenpinnan laskun vaikutuksesta. Pohjanläheinen virtaama kääntyi samoin valuma-aluevirtaaman vaikutuksesta ulospäin, mutta vedenpinnan laskulla oli päinvastainen vaikutus. Laskun aikana pohjakerrokseen syntyi pintavirtauksen vastainen paluuvirtaus sisäänpäin. Kolmen tunnin tarkastelussa virtaus suuntautui ulospäin niin kuin pinta-kerroksessakin.

Tammisaaren salmien suolaisuus 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä nousi sisäänvirtaaman ja vedenpinnan laskun vaikutuksesta ja laski vedenpinnan nousun vaikutuksesta.

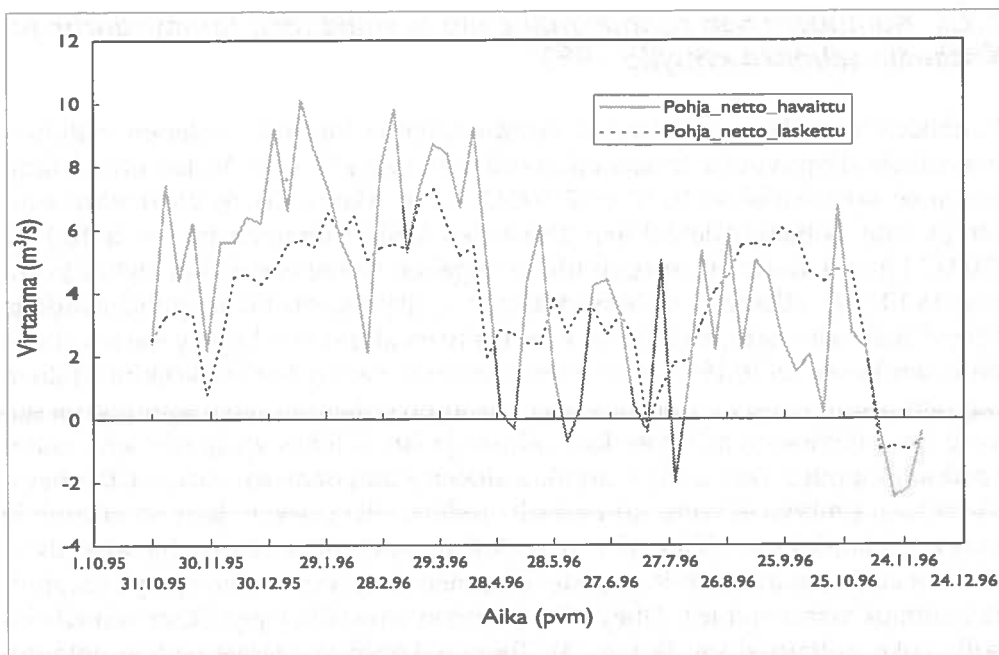
Taulukko 19. Tammisaaren salmien virtaaman ja suolaisuuden viikko-keskiarvojen regressioyhtälöt. Keskinäiset riippuvuudet sekä riippuvuus vedenkorkeusmuutoksesta ja valuma-aluevirtaamasta.

Regressioyhtälö	R <sup>2</sup>
$Q_{NET} = -0,507 \times Q_{VAL} + 0,192 \times W_{DT} - 0,253 \times Q_{VALI} + 0,349 \times W_{DTP} - 10,582$	0,74
$Q_{IN} = 0,823 \times W_{DTP} - 0,362 \times W_{DTM} - 0,309 \times Q_{VALI} + 0,127 \times W + 22,464$	0,58
$Q_{PONET} = -0,097 \times Q_{VAL} - 0,051 \times W + 5,163$	0,37
$Q_{POIN} = -0,112 \times Q_{VAL} - 0,135 \times W_{DTM} - 0,030 \times W + 7,323$	0,28
$Q_{POOUT} = 0,092 \times Q_{VALI} - 0,045 \times W_{DTP} - 0,719$	0,25
$SA_{PI} = 0,021 \times Q_{IN} + 0,023 \times Q_{NETI} - 0,008 \times W_{DTI} + 2,044$	0,50
$SA_{PO} = 0,154 \times Q_{PONET} - 0,037 \times W_{DTP} + 0,025 \times Q_{IN} - 0,013 \times W_{DTI} + 3,248$	0,55
$SA_{PO} = 0,027 \times Q_{NET} - 0,055 \times W_{DTP} + 0,022 \times Q_{IN} - 0,019 \times W_{DTI} + 4,666$	0,43
$SA_{PO} = 0,186 \times Q_{PONET} + 3,441$	0,39

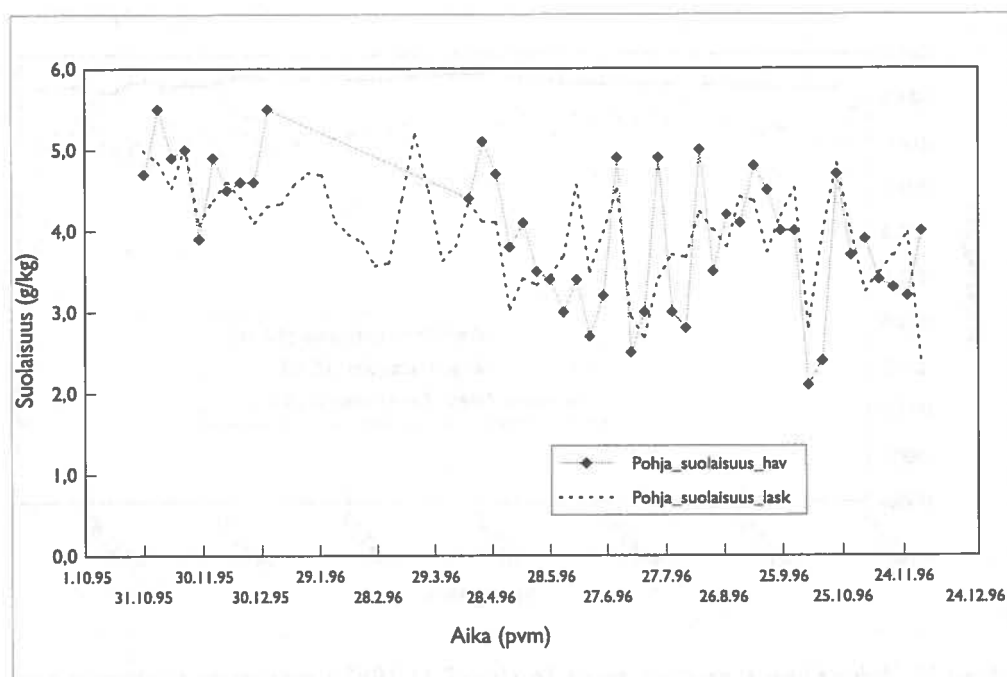
- $Q_{IN}$  = Sisäänvirtaus (brutto) Tammisaaren salmissa (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).  
 $Q_{NET}$  = Nettovirtaus Tammisaaren salmissa (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).  
 $Q_{PONET}$  = Nettovirtaus Tammisaaren salmien pohjanläheisessä kerroksessa (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).  
 $Q_{POIN}$  = Sisäänvirtaus Tammisaaren salmien pohjanläheisessä kerroksessa (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).  
 $Q_{POOUT}$  = Ulosvirtaus Tammisaaren salmien pohjanläheisessä kerroksessa (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).  
 $SA_{PI}$  = Suolaisuus Tammisaaren länsisalmissa (pintamittari, g kg<sup>-1</sup>).  
 $SA_{PO}$  = Suolaisuus Tammisaaren länsisalmissa (pohjamittari, g kg<sup>-1</sup>).  
 $Q_{VAL}$  = Virtaama valuma-alueelta (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).  
 $Q_{VALI}$  = Virtaama valuma-alueelta edellisen viikon aikana (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).  
 $W$  = Vedenkorkeus Hangon mareograafilla (cm)  
 $W_{DT}$  = Vedenkorkeuden muutos (netto) Hangon mareograafilla viikon aikana (cm vk<sup>-1</sup>).  
 $W_{DTI}$  = Vedenkorkeuden muutos (netto) Hangon mareograafilla edellisen viikon aikana (cm vk<sup>-1</sup>).  
 $W_{DTP}$  = Vedenkorkeuden nousu (brutto) Hangon mareograafilla viikon aikana (cm vk<sup>-1</sup>).  
 $W_{DTM}$  = Vedenkorkeuden lasku (brutto) Hangon mareograafilla viikon aikana (cm vk<sup>-1</sup>).  
 $Q_{NETI}$  = Nettovirtaama Tammisaaren salmissa edellisen viikon aikana (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).



Kuva 50. Havaitut ja regressiomalleilla lasketut nettovirtaama-aikasarjat Tammisaaren salmien koko poikkileikkauksessa (24.10.1995–9.12.1996). Negatiivinen arvo tarkoittaa ulosvirtausta.



Kuva 51. Havaitut ja regressiomalleilla lasketut nettovirtaama-aikasarjat Tammisaaren salmien pohjanläheisessä poikkileikkausalueella (24.10.1995–9.12.1996). Positiivinen arvo tarkoittaa sisäänvirtausta.

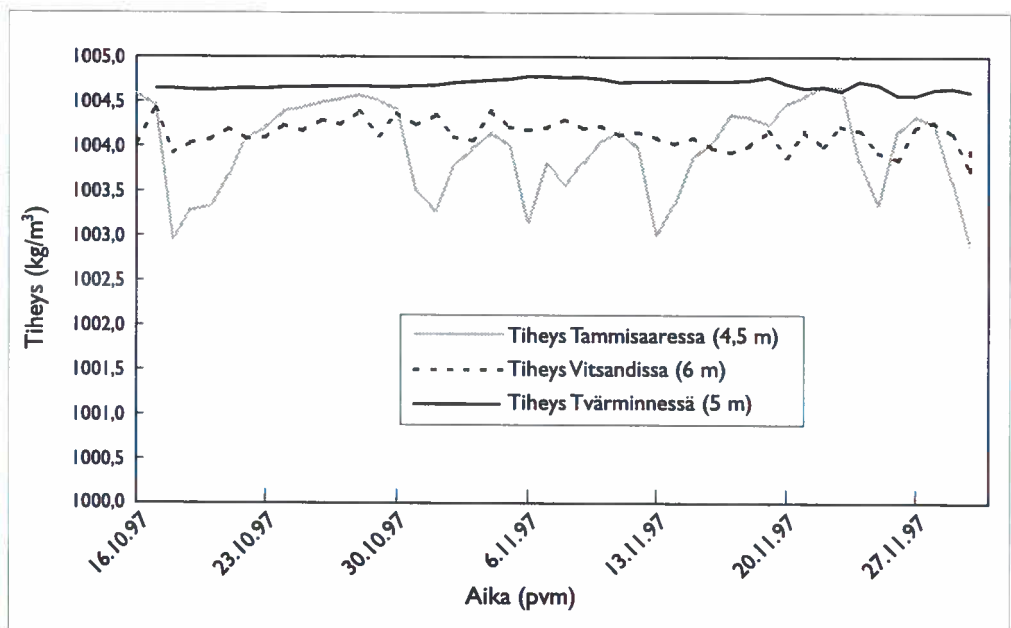


Kuva 52. Havaitut ja regressiomalleilla lasketut suolaisuus-aikasarjat Tammisaaren salmien pohjanläheisessä poikkileikkausalueella (24.10.1995–9.12.1996).

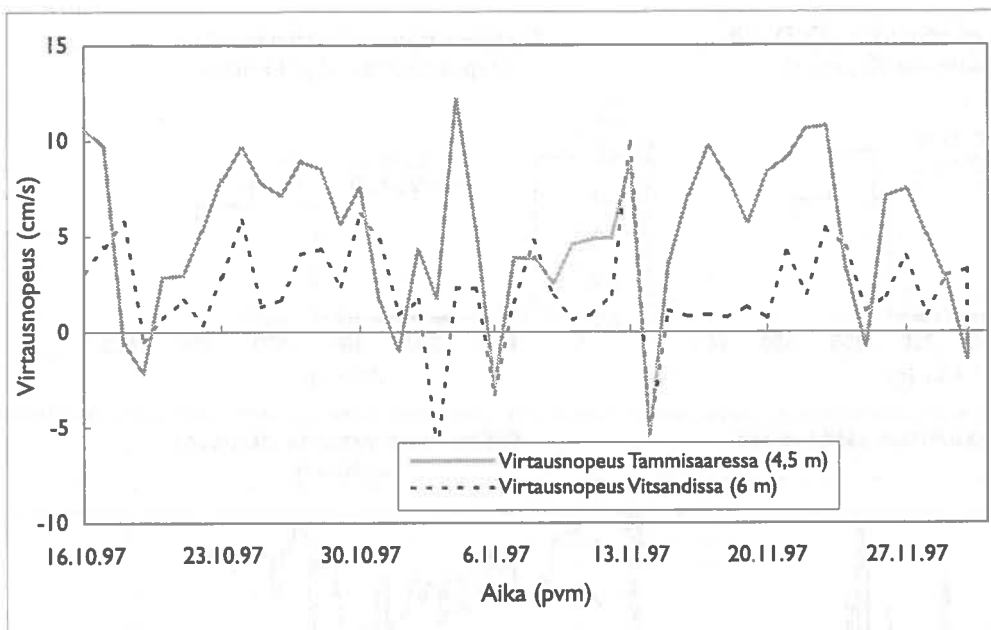


### 3.2.6 Kumpuaminen rannikkoalueella ja vaihdunta Tammisaaren ja Vitsandin salmissa syksyllä 1997

Rannikkoalueen kumpuamisen ja Tammisaaren ja Vitsandin salmien vaihdunnan välistä riippuvuutta tarkasteltiin erikseen syksyllä 1997. Veden tiheys Tammisaaren salmissa oli jo 16.10.1997  $1004,5 \text{ kg m}^{-3}$  (kuva 53). Se oli selvästi suurempi kuin Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräinen tiheys 28.10.1997 ( $1003,2 \text{ kg m}^{-3}$ ). Koska alusveden tiheys ei paljon vaihtelee, voidaan olettaa jo ennen 16.10.1997 alkaneen sisäänvirtauksen syrjäyttäneen Pohjanpitäjänlahdelta tiheydeltään alhaisempaa alusvettä ja uusineen alusveden happivarastoa. Tästä oli osoituksena 28.10.1997 alusvedessä mitattu varsin korkea keskimääräinen happipitoisuus  $8 \text{ mg l}^{-1}$ . Tiheysvirtaus Vitsandin ja Tammisaaren salmissa oli selvästi havaittavissa jo mittausjakson alussa ja jatkui lähes yhtäjaksoisena mittausjakson loppuun (kuva 54). Rannikkoalueen kumpuamisen vaikutusta tiheysvirtauksen syntyyn ei voitu mittauksilla todeta, sillä tiheysvirtaus oli alkanut jo ennen mittausjakson alkua. Yhteyden toteamiseksi olisi pitänyt havaita tiheyden nousu Tvärminnen mittauspisteellä ennen tiheysvirtauksen syntyä (ts. aloittaa mittaus aikaisemmin). Tiheys Tvärminnen edustalla pysyi lähes samalla tasolla koko mittausjakson (kuva 53). Todennäköisin syy sisäänpäin suuntautuvaan tiheysvirtaukseen lienee kuitenkin Lohjanjärven alhainen juoksutus (alle  $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ).



Kuva 53. Veden tiheys (päiväkeskiarvot) 16.10.–27.11.1997 Tammisaaren salmissa 4,5 m syvyydessä, Vitsandin salmissa 6 m syvyydessä sekä Tvärminnen edustalla 5 m syvyydessä.



Kuva 54. Virtausnopeus (salmen suuntainen komponentti, päiväkeskiarvot) 16.10.–27.11. 1997 Tammisaaren salmessa 4,5 m syvyydessä ja Vitsandin salmessa 6 m syvyydessä. Positiivinen arvo tarkoittaa sisäänvirtausta.

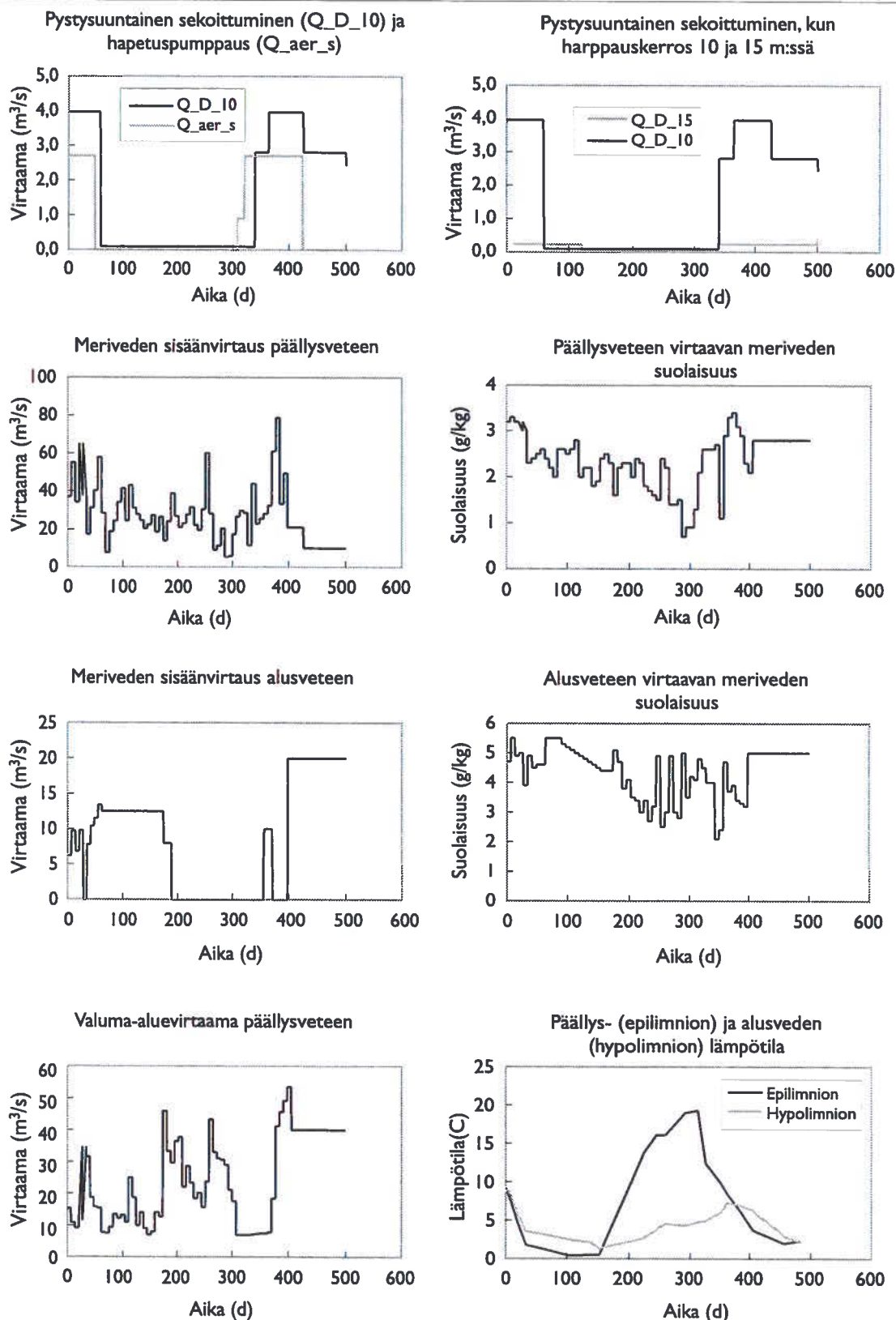
### 3.3 Pohjanpitäjänlahden happi- ja suolataseet

#### 3.3.1 Suola- ja happitasemallien kalibrointi

Kuvassa 55 on esitetty suola- ja happitasemallin syöttötietoina 25.10.1995–8.12.1996 käytetyt havaintosarjat. 10 min havaintoarvoista on laskettu viikkokeskiarvot. Alusveteen tuleva meriveden virtaus saatiin Tammisaaren salmien pohjanläheisen alusvettä tiheämpien nettovirtausjaksojen viikkokeskiarvoina ja tiheys salmessa 4,5 m syvyydessä havaitun suolaisuuden ja lämpötilan perusteella. Päälysveteen tulevana meriveden virtauksena käytettiin ensin Tammisaaren salmien pintakerroksen nettovirtausjaksojen viikkokeskiarvoja. Loppusyksyn suolaisuuden nousua ei voitu mallilla kuitenkaan selittää muuten kuin käyttämällä Tammisaaren salmien pintakerroksen bruttosisäänvirtausjaksojen viikkokeskiarvoja. Sisäänvirtaavan veden suolaisuus saatiin salmessa 1,5 m syvyydessä havaitun lämpötilan ja sähkönjohtokyvyn perusteella.

#### Suolatasemalli ja vertikaalinen sekoittuminen

Pohjanpitäjänlahti on kaiken aikaa voimakkaasti kerrostunut, vaikkakin kerrostuneisuuden jyrkkyys vaihtelee. Loppusyksystä päälysveden suolaisuus nousee, ja kerrostuminen väliaikaisesti loivenee. Pystysuuntaisen sekoittumisen suuruus arvioitiin pystysuuntaisen suola- ja lämpötilagradienttien muutoksista (Stipa 1996 b). Voimakkaasti kerrostuneena aikana alusveden pystysuuntainen sekoittuminen oli hyvin pientä ( $10^{-4}$ – $10^{-5}$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>). Harppauskerroksen sekoittumiskertoimeksi valittiin  $8,64 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup> vrk<sup>-1</sup> (taulukko 20). Loppusyksyn sekoittumiskerrointa ei saatu suolagradienttien muutoksista määrittystä häiritsevien merivesipulssien takia, joten se kalibroitiin suolatasemallin avulla. Kalibroinnin tuloksena saatiin sekoittumiselle arvo 0,24 m<sup>2</sup> vrk<sup>-1</sup>, kun harppauskerros on 10 metrissä. Koska harppauskerroksen sijainti ja muoto hieman vaihtelee, vaikka pysyykin pääsääntöisesti 10 metrissä, kalibroitiin sekoittumiskerroin myös tilanteelle, jossa harppaus-



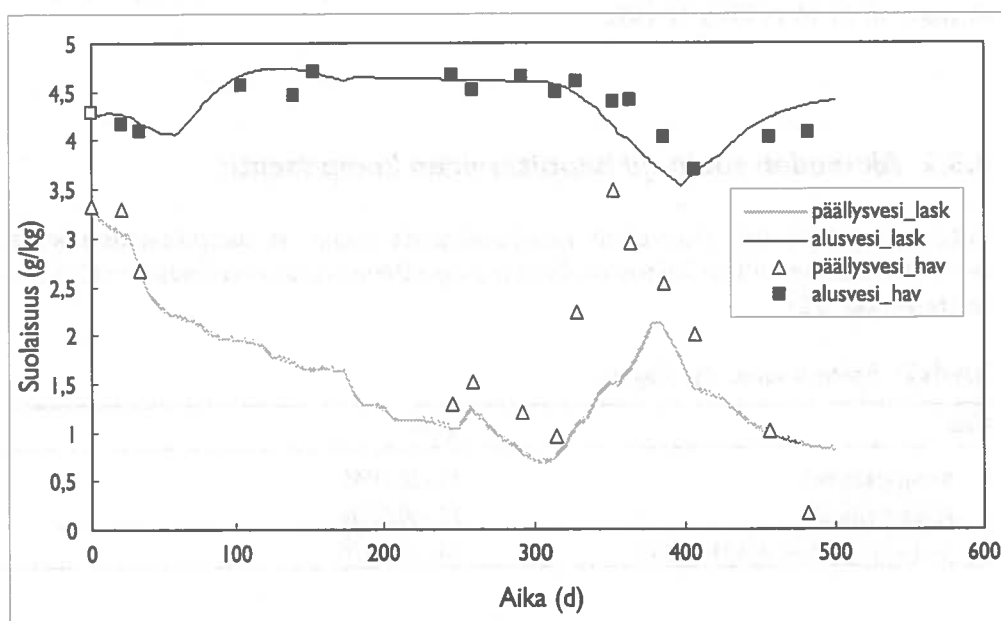
Kuva 55. Suola- ja happitasemallin syöttötiedot 25.10.1995–8.12.1996: hapetuspumppujen aiheuttama vaihdunta ( $Q_{aer\_s}$ ) alus- ja päälysveden välille, pystysuuntaisen sekoittumisen aiheuttama vaihdunta alus- ja päälysveden välille, kun harppauskerros on 10:ssä ( $Q_{D\_10}$ ) ja 15:ssä ( $Q_{D\_15}$ ) metrissä, meriveden sisäänvirtaus Pohjanpitäjänlahden päälysveteen, mereltä päälysveteen virtaavan veden suolaisuus, meriveden sisäänvirtaus Pohjanpitäjänlahden alusveteen, mereltä alusveteen virtaavan veden suolaisuus, valuma-aluevirtaama Pohjanpitäjänlahden päälysveteen, Pohjanpitäjänlahden päälys- ja alusveden lämpötila.

kerros on 15 metrissä. Tällöin se oli  $0,03 \text{ m}^2 \text{ vrk}^{-1}$ , eli vajaa kymmenes osa siitä mitä se olisi, jos harppauskerros olisi 10 metrissä. Mallin pystysuuntaisen sekoittumisen suuruus riippuu siis hyvin paljon harppauskerroksen oletetusta sijainnista.

Suolapitoisuuden vaihtelu päällys- ja alusvedessä saatiin laskettua kohtalaisella tarkkuudella kalibroidulla sekoittumiskertoimella (Kuva 56).

Taulukko 20. Happi- ja suolatasemallin parametriarvot.

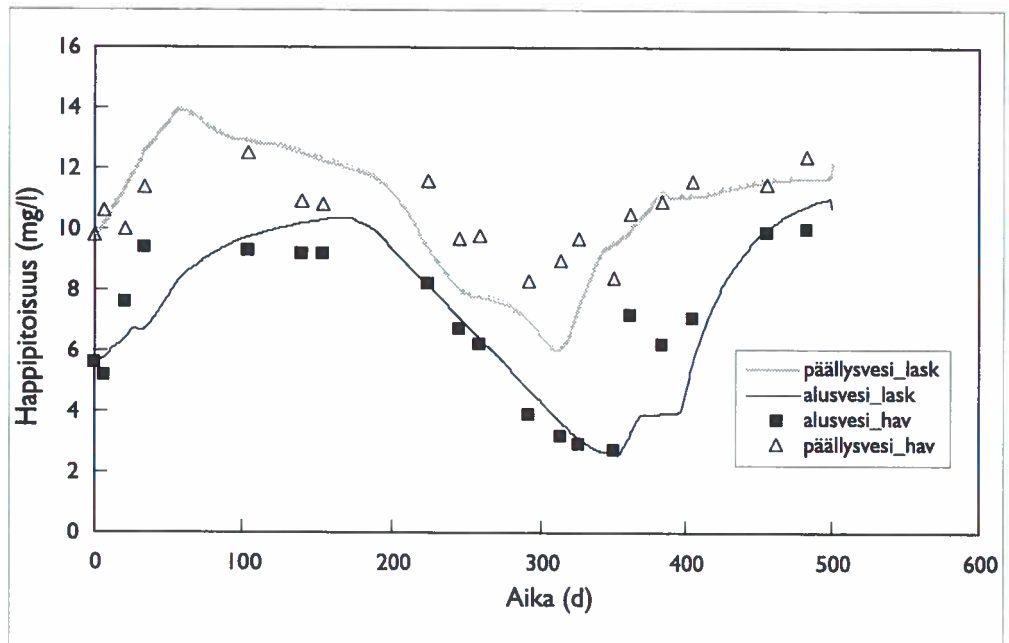
Parametri	Arvo
D — harppauskerroksen diffuusiokerroin ( $\text{m}^2 \text{ vrk}^{-1}$ ) voimakkaasti kerrostunut	$8,64 \times 10^{-3}$
loppusyksy, heikosti kerrostunut	
harppauskerros 10 m syvyydessä	0,24
harppauskerros 15 m syvyydessä	0,03
$k_{\text{O}_2\text{BOT}}$ — pohjan hapenkulutus ( $\text{g m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ )	0,148
$k_{\text{O}_2}$ — veden hapenkulutus ( $\text{g m}^{-3} \text{ vrk}^{-1}$ )	
harppauskerros 10 m syvyydessä	0,032
harppauskerros 15 m syvyydessä	0,056
$K_{\text{O}_2}$ — hapenkulutuksen happi-puolikyllästysvakio ( $\text{g m}^{-3}$ )	0,1
$\Theta_{\text{O}_2}$ — lämpötilakorjauksen kerroin	1,0014
$\nu_{\text{O}_2}$ — hapen vaihtokerroin ilman ja veden rajapinnalla ( $\text{m vrk}^{-1}$ )	$0,7 \times 10^{-4}$
jääpeitteisenä aikana	0
$V_e$ — päällysveden tilavuus ( $\text{m}^3$ )	
harppauskerros 10 m syvyydessä	$1,5669 \times 10^6$
harppauskerros 15 m syvyydessä	$1,9506 \times 10^6$
$V_h$ — alusveden tilavuus ( $\text{m}^3$ )	
harppauskerros 10 m syvyydessä	$7,6522 \times 10^7$
harppauskerros 15 m syvyydessä	$3,8149 \times 10^7$
$A_e$ — päällysveden pinta-ala ( $\text{m}^2$ )	$2,2991 \times 10^7$
$A_h$ — alusveden pinta-ala ( $\text{m}^2$ )	
harppauskerros 10 m syvyydessä	$9,9859 \times 10^6$
harppauskerros 15 m syvyydessä	$5,8479 \times 10^6$



Kuva 56. Havaittu ja tasemallilla laskettu suolapitoisuus Pohjanpitäjänlahden päällys- ja alusvedessä 25.10.1995–8.12.1996.

## Happitasemalli ja hapenkulutuskertoimet

Happitasemallin hapenkulutuserroin vedessä ( $k_{O_2}$ ) ja lämpötilakorjauksen kerroin ( $\theta_{O_2}$ ) kalibroitiin samanaikaisesti alusveden havaitun happipitoisuuden perusteella (kuva 57 ja taulukko 20). Pohjan hapenkulutuksena käytettiin Väisäsen ja Hellstenin (1997) hapenkulutuskokeen tulosta. Mitattu (2.9.1997) hapenkulutus oli  $0,148 \text{ g m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ . Happi- puolikyllästysvakioiksi valittiin  $0,1 \text{ g m}^{-3}$ . Tällöin hapen puute rajoittaa mallin hapenkulutusta vasta hyvin lähellä nolla-pitoisuutta. Veden hapenkulutukseksi saatiin  $0,032 \text{ g m}^{-3} \text{ vrk}^{-1}$  ja  $0,056 \text{ g m}^{-3} \text{ vrk}^{-1}$ , kun harppauskerros oli vastaavasti 10 ja 15 metrissä. Lämpötilakorjauksen kertoimeksi saatiin 1,0004. Happipitoisuuden vaihtelu alusvedessä saatiin laskettua riittäväällä tarkkuudella kalibroiduilla kertoimilla (kuva 57).



Kuva 57. Havaittu ja tasemallilla laskettu happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden päälyls- ja alusvedessä 25.10.1995–8.12.1996.

### 3.3.2 Alusveden suola- ja happitaseiden komponentit

Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräisiä suola- ja happitaseiden komponentteja tarkasteltiin kerrostumisen ja jääpeitteen suhteen kolmessa eri jaksossa (taulukko 21).

Taulukko 21. Taseiden tarkastelujaksojen ajoitus.

Jakso	Ajoitus
I talvi-jääpeitteinen	1.1.–30.4.1996
II kesä-kerrostunut	1.5.–30.8.1996
III syksy-alkutalvi-heikomin kerrostunut	1.9.–31.12.1996

Jaksoille laskettiin taseiden keskimääräiset komponentit mittaus- ja mallitulos-  
ten pohjalta luvussa 2.5 kuvatulla tavalla.

### Suolataseen komponentit

Alusveden suolavarasto ei vaihdellut mittausjaksolla kovin voimakkaasti (319276–354230 tn, taulukko 22 ja kuva 58).

Talvella (jakso I) varasto (384612 tn) kasvoi 98 tn vrk<sup>-1</sup> merivesipulssien ansiosta (5052 tn vrk<sup>-1</sup>). Samanaikaisesti alusveden mukana virtasi ulos merelle 4667 tn vrk<sup>-1</sup>, ja vertikaalisen sekoittumisen ansiosta poistui 22–27 tn vrk<sup>-1</sup>. Vertikaalisen sekoittumisen suuruutta haarukoitiin harppauskerroksen sijainnin perusteella (10–15 m syvyydessä). Suolavaraston viipymä oli vain 0,2 vuotta.

Kesän kerrostuneella jaksolla (jakso II) varasto oli suurimmillaan (354230 tn), mutta pieneni 42 tn vrk<sup>-1</sup>. Viipymä piteni merkittävästi (38 vuotta) merivesipulssien puuttumisen vuoksi. Suolaa poistui alusvedestä jonkin verran ulosvirtauksen (11 tn vrk<sup>-1</sup>) ja vertikaalisen sekoittumisen (28–16 tn vrk<sup>-1</sup>) ansiosta. Hapetuspumppaus aloitettiin aivan jakson lopulla, joten se ei ehtinyt suuresti vaikuttaa jakson suolataseeseen.

Syksyn-alkutalven (jakso III) aikana suolavarasto oli pienimmillään (319276 tn). Varasto pieneni 85 tn vrk<sup>-1</sup> vertikaalisen sekoittumisen (1316–28 tn vrk<sup>-1</sup>) ja ulosvirtauksen (3207 tn vrk<sup>-1</sup>) ansiosta. Samanaikaisesti suolavarastoa uusi meriveden sisäänvirtaus (2957 tn vrk<sup>-1</sup>) ja hapetus (497 tn vrk<sup>-1</sup>). Viipymä oli selvästi lyhyempi kuin kesällä (0,4 v).

Suolataseen virhe oli kohtuullinen (2,7–12 % taseen kaikkien komponenttien itseisarvojen summasta). Virhe oli pienimmillään talven jääpeitteisellä jaksolla (I) ja suurimmillaan jaksolla (III). Taseen komponenteista vertikaaliseen sekoittumiseen ja varastomuutokseen liittyy suurin epävarmuus. Vertikaalisesta sekoittumisesta ei ole suoria mittauksia, vaan arvio siitä perustuu tasemallin kalibrointiin. Varaston muutos laskettiin siten, että oletettiin alusveden tilavuuden pysyvän vakiona. Todellisuudessa harppauskerroksen sijainti ja jyrkkyys vaihtelee vuoden aikana jonkin verran.

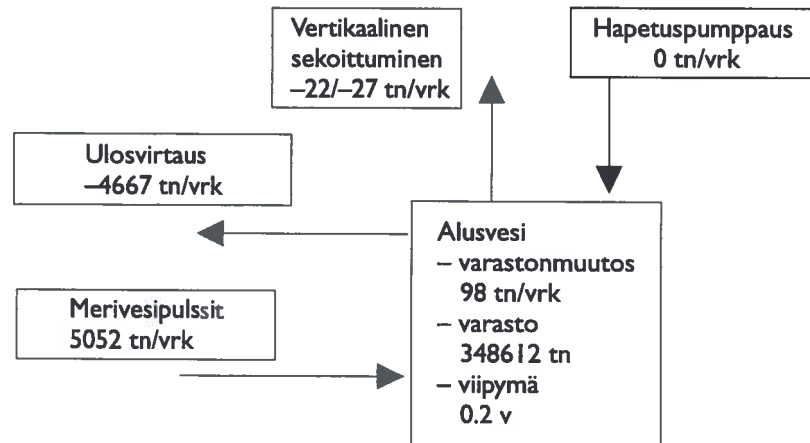
Vaikka hapetuspumppaus lisäsi syksyllä ja alkutalvesta alusveden suolavarastoa, sillä oli alusveden suolapitoisuutta laimentava vaikutus, koska pumpattavan päällysveden pitoisuus on alempi kuin alusveden.

Taulukko 22. Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräinen suolatase (tn vrk<sup>-1</sup>) kolmessa jaksossa: jääpeitteinen jakso (1.1.–30.4.1996), kerrostunut (1.5.–30.8.1996) ja heikommin kerrostunut (1.9.–31.12.1996).

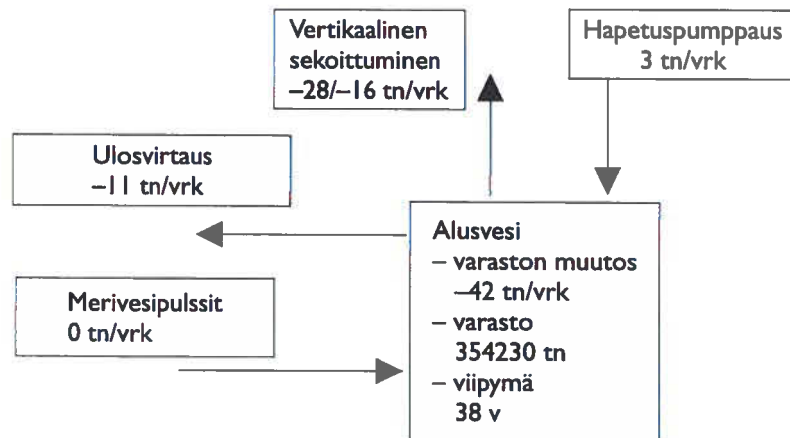
Jakso	Pystysuuntainen sekoittuminen	Hapetus-pumppaus	Sisään-virtaus	Ulos-virtaus	Varaston muutos	Virhe (tn vrk <sup>-1</sup> /%)
1	-22(–27)	0	5052	-4667	98	265/3
2	-28(–16)	3	0	-11	-42	6/7
3	-1316(–28)	497	2957	-3207	-85	984/12



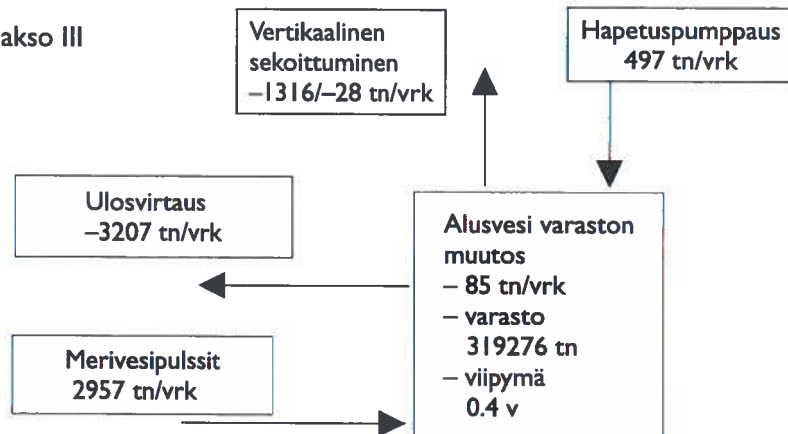
### Jakso I



### Jakso II



### Jakso III



Kuva 58. Kaavio; Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräinen suolatase kolmessa jaksossa: jääpeitteinen jakso (1.1–30.4.1996), kerrostunut (1.5.–30.8.1996) ja heikomminkin kerrostunut (1.9.–31.12.1996).

## Happitaseen komponentit

Alusveden happivarasto vaihteli voimakkaammin kuin suolavarasto 714–484 tn (taulukko 23 ja kuva 59). Talven jääpeitteisellä jaksolla (I) varasto oli suurimmillaan 714 tn ja kesän ja alkusyksyn jaksolla (II) pienimmillään 484 tn.

Talvella (jakso I) happivarasto (714 tn) pieneni 196 kg vrk<sup>-1</sup> hapenkulutuksen (4466 kg vrk<sup>-1</sup>) vaikutuksesta. Meriveden sisäänvirtaus (11876 kg vrk<sup>-1</sup>) ja ulosvirtaus (9435 kg vrk<sup>-1</sup>) olivat lähes tasapainossa. Vertikaalinen sekoittuminen (21–31 kg vrk<sup>-1</sup>) oli melko vähäistä. Happivaraston viipymä oli lyhyt, vain 0,2 v.

Kesän kerrostuneella jaksolla (II) happivarasto (484 tn) pieneni 505 kg vrk<sup>-1</sup> hapenkulutuksen (4455 kg vrk<sup>-1</sup>) ansiosta. Meriveden horisontaalinen vaihdunta (sisään 0 kg vrk<sup>-1</sup> ja ulos 8 kg vrk<sup>-1</sup>) oli samanaikaisesti vaimentunut hyvin pieneksi. Vertikaalinen sekoittuminenkin oli melko pientä (32–19 kg vrk<sup>-1</sup>). Hapetuspumppaus (22 kg vrk<sup>-1</sup>) ei vielä ehtinyt merkittävästi vaikuttamaan jakson happitaseeseen. Happivaraston viipymä oli pitkä (24 v).

Alkutalvesta (jakso III) happivarasto oli pienimmillään (428 tn). Meriveden sisäänvirtauksen (6969 kg vrk<sup>-1</sup>), vertikaalisen sekoittumisen (3405–74 kg vrk<sup>-1</sup>) ja hapetuspumppauksen (2075 kg vrk<sup>-1</sup>) ansiosta happivarasto kasvoi 225 kg vrk<sup>-1</sup>. Hapenkulutus oli 4442 kg vrk<sup>-1</sup>. Happivaraston viipymä oli lyhyt (0,2 v).

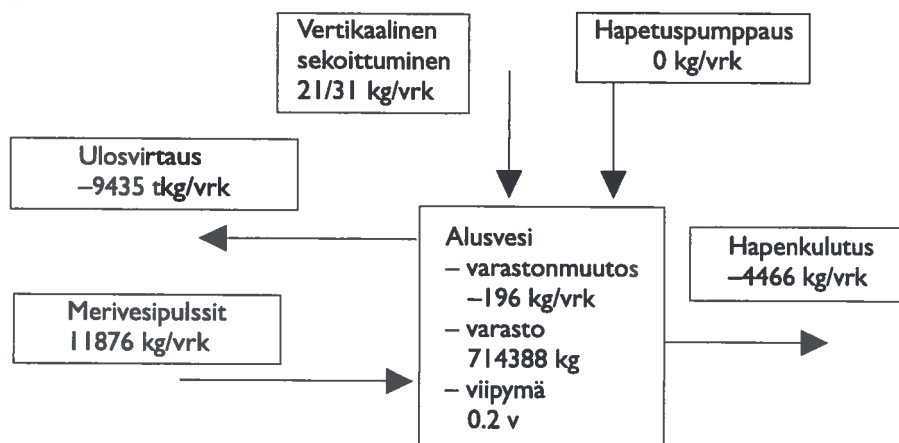
Hapetuspumppauksella oli huomattava vaikutus (2075 kg vrk<sup>-1</sup>) happitaseeseen syksyllä (jakso III). Se oli vähintään yli puolet vertikaalisesta sekoittumisesta (3405–74 kg vrk<sup>-1</sup>), puolet hapenkulutuksesta (4442 kg vrk<sup>-1</sup>) ja noin kolmannes meriveden sisäänvirtauksesta (6969 kg vrk<sup>-1</sup>).

Happitaseen virhe oli kesäjaksoa (II) lukuun ottamatta kohtuullinen 8,5–9,2 %. Kesällä, kun hapen kierto oli pysähdyksissä virheen (77 %) osuus korostui. Happitaseen virhelähteet olivat paljolti samat kuin suolataseessa. Veden hapenkulutus, josta ei ollut pohjan hapenkulutuksesta poiketen lainkaan suoriamittauksia, aiheutti lisää epätarkkuutta taseeseen. Tasemalliin valittu kesäajan sekoittumiskerroin kuten myös mitattu meriveden sisäänvirtaus saattoivat aliarvioida sekoittumisen ja sisäänvirtauksen todellista suuruutta.

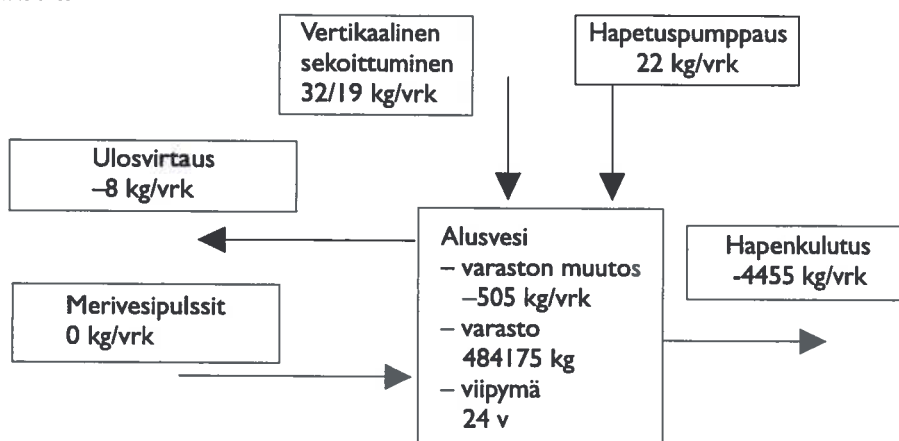
Taulukko 23. Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräinen happitase (kg vrk<sup>-1</sup>) kolmessa jaksossa: jääpeitteinen jakso (1.1–30.4.1996), kerrostunut (1.5.–30.8.1996) ja kerrostumaton (1.9.–31.12.1996).

Jakso	Pystysuuntainen sekoittuminen	Hapetus-pumppaus	Sisään-virtaus	Ulos-virtaus	Hapen kulutus	Varaston muutos	Virhe (kg vrk <sup>-1</sup> /%)
1	21(-31)	0	11876	-9435	-4466	-196	2200/8
2	32(-19)	22	0	-8	-4455	-505	3904/77
3	3405(-74)	2075	6969	-5968	-4422	225	2104/9

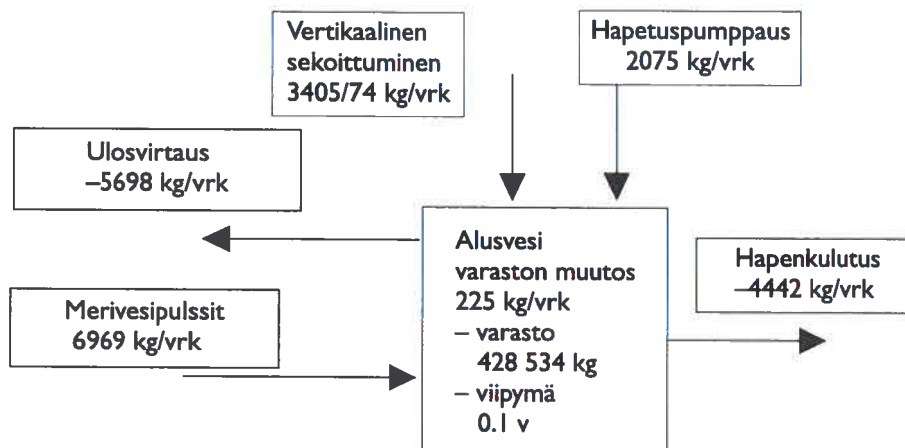
### Jakso I



### Jakso II



### Jakso III



Kuva 59. Kaavio; Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräinen happitase kolmessa jaksossa: jääpeitteinen jakso (1.1–30.4.1996), kerrostunut (1.5.–30.8.1996) ja kerrostumaton (1.9.–31.12.1996).

## 3.4 Virtausten, kulkeutumisen ja vedenlaadun 3D-laskenta

### 3.4.1 Virtauslaskennan varmistus

#### Vertailu mittaustulosten tilastanalyysin tuloksiin

Virtauslaskennan varmistus keskittyy tässä ensi sijassa mittaustulosten tilastanalyysistä saatujen regressioyhtälöiden ja laskentatulosten väliseen vertailuun. Näiden lisäksi vertailtiin mitattuja ja laskettuja virtausvaihteluita keskenään muutamilta lyhyehköiltä, merkitykseltään keskeisiltä ajanjaksoilta. Yleiskokemuksen perusteella arvioitiin lisäksi pelkistettyjen, luonnossa ohimennon esiintyvien erityistilanteiden kulkeutumistuloksia.

Taulukkoon 24 on koottu edellä taulukossa 16 esitettyjen regressioyhtälöiden perusteella johdetut Tammisaaren salmien eri kerrosten virtaamien riippuvuudet veden korkeuden muutoksista, valuma-aluevirtaamasta ja tuulesta sekä verrattu näitä 3D-mallin avulla laskettuihin riippuvuuslausekkeisiin.

Taulukko 24. Taulukossa 16 esitettyjen regressioyhtälöiden perusteella johdetut Tammisaaren salmien eri kerrosten virtaamien riippuvuudet veden korkeuden muutoksista, valuma-aluevirtaamasta ja tuulesta sekä 3D-mallin avulla lasketut riippuvuuslausekkeet.

Alusveden $q_a' =$	
$3,512z' - 0,173Q' + 3,953Wn' + 0,202We' + 11,20$	(kerrostumaton kausi)
$4,446z' - 0,398Q' + 0,772Wn' + 3,698We' + 21,77$	(kerrostunut kausi)
$6,534z' - 0,319Q' + 0,218Wn' + 0,602We' + 16,70$	(jääpeitteinen kausi)
$11,68z' - 0,248Q' + 0,409Wn' - 0,252We' + 7,32z'_{-}$	(3D-mallilla laskettu)
Päällysveden $q_p' =$	
$15,61z' - 0,558Q' + 0,018Wn' - 0,274We' - 7,51$	(kerrostumaton kausi)
$11,85z' - 0,914Q' - 0,460Wn' - 0,317We' - 0,19$	(kerrostunut kausi)
$18,75z' - 0,270Q' + 0,0Wn' + 0,114We' - 16,38$	(jääpeitteinen kausi)
$7,32z' - 0,752Q' - 0,409Wn' + 0,252We' - 7,32z'_{-}$	(3D-mallilla laskettu)
Koko poikkipinta yhdistettynä $q_a' + q_p' =$	
$19,12z' - 0,731Q' + 3,972Wn' - 0,072We' + 3,69$	(kerrostumaton kausi)
$16,30z' - 1,312Q' + 0,311Wn' + 3,381We' + 21,58$	(kerrostunut kausi)
$25,11z' - 0,589Q' + 0,218Wn' + 0,716We' + 0,32$	(jääpeitteinen kausi)
$19,00z' - 1,0Q'$	(3D-mallilla laskettu)

Taulukossa 24 on käytetty merkintöjä:

$$\begin{aligned} q_a' &= q_{Ta} \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)} \\ q_p' &= q_{Tp} \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)} \\ Q' &= Q_{va} \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)} \\ z' &= dz/dt \text{ (cm 3h}^{-1}\text{)} \\ Wn' &= WN \text{ (m s}^{-1}\text{)} \\ We' &= WE \text{ (m s}^{-1}\text{)}, \end{aligned}$$

missä

$$\begin{aligned} Q_{va} &= \text{valuma-alueelta tuleva virtaama m}^3 \text{ s}^{-1}, \\ dz/dt &= \text{vedenkorkeuden muutosnopeus cm h}^{-1}, \\ WN &= \text{tuulennopeuden pohjoiskomponentti (pohjoisesta etelään suuntautuva) (m s}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

- WE = tuulennopeuden itäkomponentti (idästä länteen suuntautuva)  $\text{m s}^{-1}$ .
- $q_{Ta}$  = alusveden (3m-pohja) virtaama Tammisaaren siltojen ali Pohjanpitäjänlahdelle  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .
- $q_{Tp}$  = päällysveden (0–3m) virtaama Tammisaaren siltojen ali Pohjanpitäjänlahdelle  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

Kunkin virtauksia aiheuttavan tekijän ( $Q'$ ,  $z'$ ,  $W_n'$  ja  $We'$ ) kertoimet on saatu suoraan taulukon 16 mittaustulosriippuvuuksista laskemalla kaikkien viivästysten kertoimet yhteen. Mittaustuloksista johdetut lausekkeet taulukossa 24 tarkoittavat näin ollen vähintään 15 tuntia muuttumattomina jatkuneiden olojen vaikutuksia. Samoilla ehdoilla määriteltiin myös niihin verrattujen laskentatulosten riippuvuudet.

Vertailussa kiintyy huomio tuulen nopeuden valtaosin vähäiseen merkitykseen etenkin päällysveden virtaamille sekä vedenkorkeusmuutoksen ja valuma-alueen virtaaman vaikutusten melko suureen yhtäläisyyteen eri kerrostumistilanteiden kesken sekä kohtuullisesti myös laskentatulosten kanssa (vrt. kohta 3.2.).

Mittaustulosten olosuhderiippuvuuksiin on jäänyt useimmiten varsin tuntu vakiotermi, jota lähempänä reunaa voitaisiin tulkita myös laskenta-alueen ulkopuolisten merivirtausten vaikutukseksi.

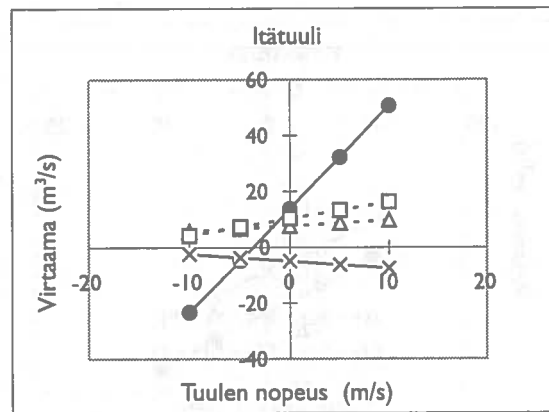
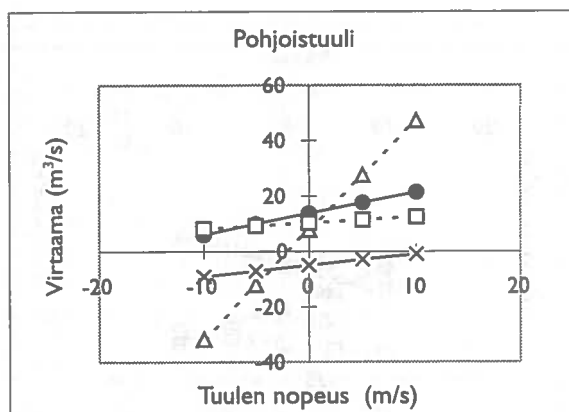
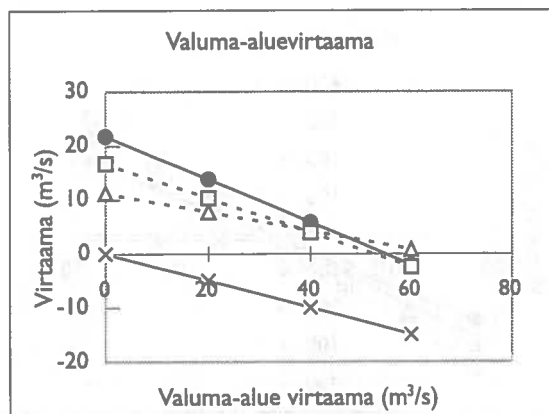
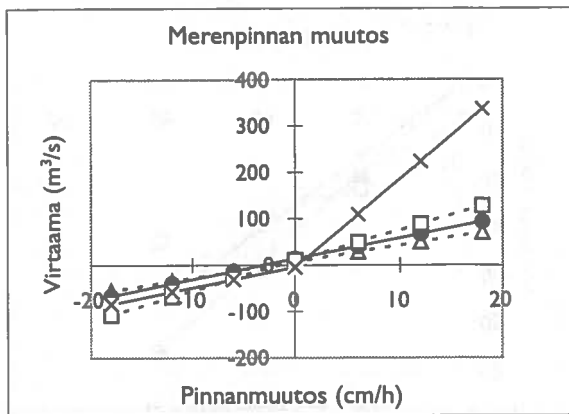
### Lausekkeiden soveltaminen erillistilanteisiin

Lausekemuotoon tiivistettyjen riippuvuuksien (taulukko 24) vertailu eri mittaustilanteiden ja laskentatulosten kesken helpottuu ja havainnollistuu katsomalla millaisiin virtaamiin ne muutamissa pelkistetyissä tilanteissa johtavat. Vertailutilanteiksi valittiin mittaustulosten kolmen tulkintajakson sekä niitä yhdessä kuvaamaan tarkoitettujen laskentatulosten alusveden ( $Q_a$ ), päällysveden ( $Q_p$ ) ja koko poikkipinnan ( $Q_T = Q_a + Q_p$ ) virtaamien riippuvuus seuraavissa tilanteissa (kuvat 60–62):

- 1 vedenkorkeuden muutoksesta virtaamalla  $20 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  tyynissä oloissa,
- 2 valuma-alueen virtaamasta vailla tuulia ja vedenkorkeuden vaihteluita,
- 3 pohjois- tai etelätuulen nopeudesta virtaamalla  $20 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  vakiovedenkorkeudella, sekä
- 4 itä- tai länsituulen nopeudesta virtaamalla  $20 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  vakiovedenkorkeudella.

Koko poikkipinnan yhteisvirtaaman ( $Q_a + Q_p$ ) lausekkeet havainnollistavat mittaustulosten tulkinna ja laskentatulosten toisistaan poikkeavaa luonnetta, vaikka tulokset sinänsä ovat hyvinkin lähellä toisiaan. Vakiintuneen tilan laskentatuloksissa ulosvirtaus Tammisaaresta oli täsmälleen sama kuin tulovirtaama valuma-alueelta. Samoin vedenkorkeuden muutoksen aiheuttama virtaama oli suoraan muutosnopeus kerrottuna pinta-alalla.

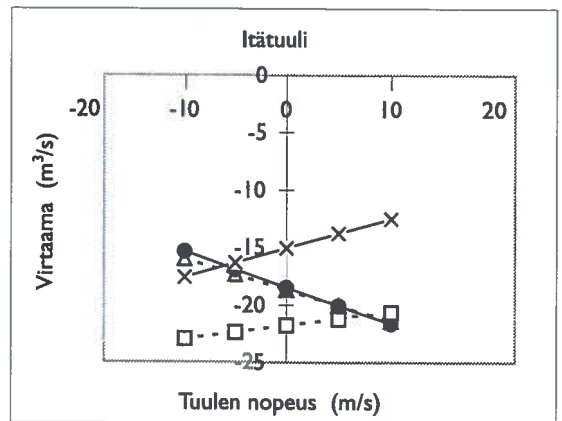
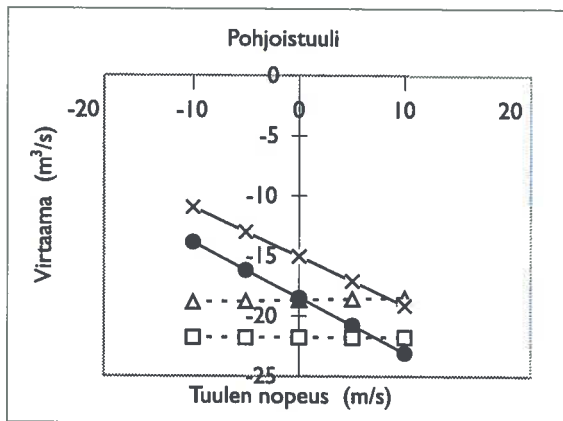
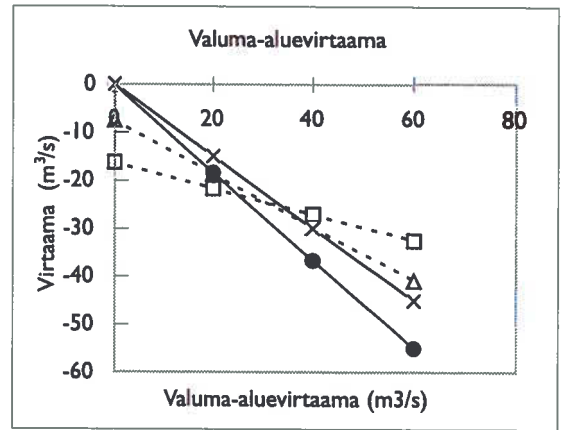
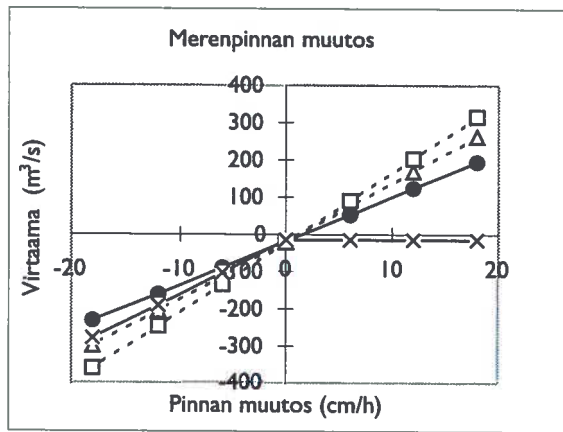
Koko poikkipinnan yli tarkasteltuna tuulen ja valuma-aluevirtaaman aiheuttamat meno- ja paluuvirtaamat kumoavat 3D-laskentatuloksissa tarkasti toisensa. Mittaustuloksetkaan eivät suuresti poikenneet näistä säilyvyysyhteyksistä, mutta etenkin hiljaisilla jokivirtaamilla mittaustulosten tulkinna suurehko vakiotermi johtaa alusveden tuntuvaan sisäänvirtaukseen päällysveden ulosvirtausta vastaan. Tätä vastaava pystykierto ei jokisuistoissa yleisemminkään ole epätavallista. Laskentatuloksissa se on tässä jäänyt paljastumatta mm. kolmannen laskentakerroksen (2–4 m) jakaantuessa puoliksi Tammisaaren silta-aukkojen alus- ja päällysvesien kesken.



- △--- kerrostumaton
- kerrostunut
- jääpeitteinen
- ×— laskettu virtaama

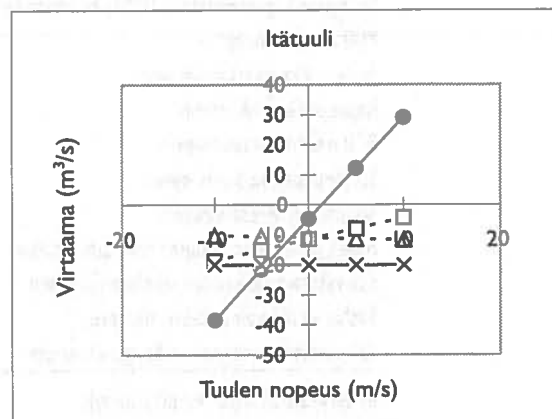
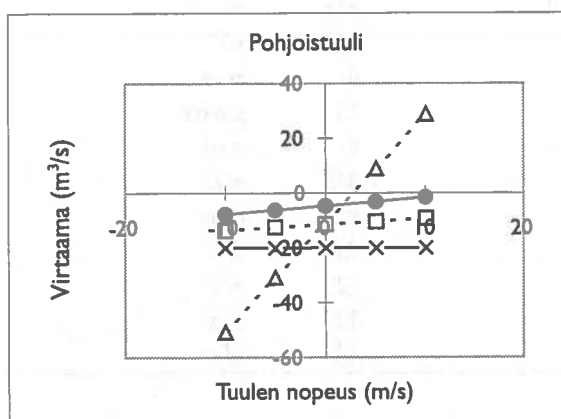
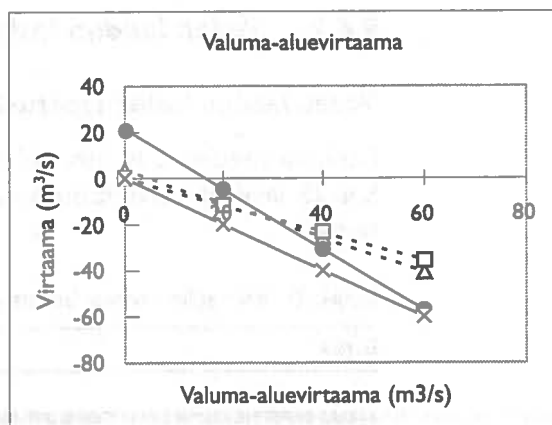
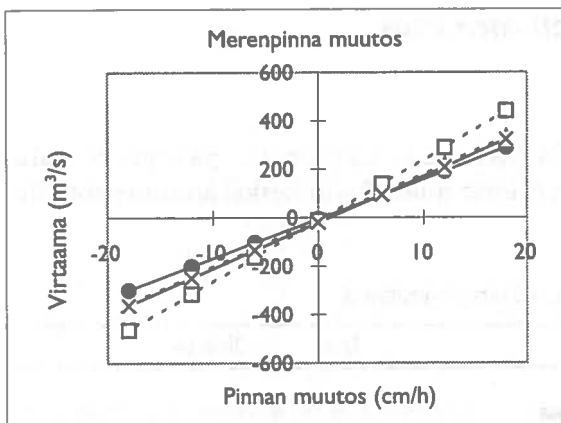
Kuva 60. Meriveden pinnan vaihtelun, valuma-aluevirtaaman, pohjoistuulen nopeuden ja itätuulen nopeuden vaikutus alusveden virtaamiin.





- △-- kerrostumaton
- kerrostunut
- jääpeitteinen
- ×— laskettu virtaama

Kuva 61. Meriveden pinnan vaihtelun, valuma-aluevirtaaman, pohjoistuulen nopeuden ja itätuulen nopeuden vaikutus päällysveden virtaamiin.



- △-- kerrostumaton
- kerrostunut
- jääpeitteinen
- ×— laskettu virtaama

Kuva 62. Meriveden pinnan vaihtelun, valuma-aluevirtaaman, pohjoistuulen nopeuden ja itätuulen nopeuden vaikutus koko poikkipinnan virtaamiin.

### 3.4.2 Veden laadun laskennan varmistus

#### Veden laadun laskentaperusteet

Lähinnä luvussa 2.8. luonnehdituilla perusteilla laskennassa päädyttiin taulukon 25. laskentakertoimiin ja muihin tulosta määääviin keskeisimpiin syöttötietoihin.

Taulukko 25. Veden laadun laskennan laskentakertoimia, -vakioita ja syöttötietoja.

Kerroin	Arvo	Dimensio
a) Koko alueelle ja kaikille ajoille yhtenäisesti määritettyjä		
Biologisen hapenkulutuksen (BOD) kulumistahti 15:ssä °C	0,09	vrk <sup>-1</sup>
BOD:n vajoamisnopeus	0,86 m	vrk <sup>-1</sup>
Tyynen sään ilmastumisnopeus	0	m vrk <sup>-1</sup>
Hapetusliän tuulikerroin	2,3	μm vrk <sup>-1</sup>
BOD:n sedimentaationopeus	0	m vrk <sup>-1</sup>
Suolaisuuden vajoamisnopeus	0,12	m vrk <sup>-1</sup>
Suolan sedimentaationopeus	0	m vrk <sup>-1</sup>
Hapen ja BOD:n vaakatason sekoittumisnopeus	0,6	cm s <sup>-1</sup>
sitä vastaava vaakatason sekoittumiskerroin	1,2	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Suolan vaakatason sekoittumisnopeus	2,6	cm s <sup>-1</sup>
sitä vastaava vaakatason sekoittumiskerroin	5,2	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
b) Syvyydestä riippuviksi määritettyjä		
Pystysuunnan sekoittumisnopeus	0 - 15 m	0
	20 - 30 m	5
sitä vastaava pystysuunnan sekoittumiskerroin		0,25
Pohjasedimentin hapenkulutus 15:ssä °C	0 - 10 m	0
	10 - 12 m	0,2
	12 - 15 m	0,4
	15 - 20 m	0,6
	20 - 25 m	0,8
	25 - 30 m	1,1
	30 - 35 m	1,6
Tuottavan kerroksen paksuus 6 m		
Tuottavan kerroksen yläosan BOD-kuorma	0 - 3 m	0
Pohjalta vapautuva BOD-kuormitus	0 - 12 m	0
Ulkomeren suolapitoisuus eteläreunan	0 - 6 m	2
	6 - 9 m	6
Tammisaaren edustan pohjan BOD-kuorma	0 - 3 m	0
	3 - 6 m	0,07 g
	6 - 10 m	0,25 g
	10 - 12 m	0,44 g
	12 - 15 m	0,54 g
	15 - 20 m	0,65 g

c) Ajasta riippumaan määritettyjä

Ajanajakso	Hajoamisen BOD-kuorma Koko alueen 3 - 10 m (tn vrk <sup>-1</sup> )	Pohjalta vapautuva BOD-kuorma Pohjanpitäjänlahden 12 - 15 m (tn vrk <sup>-1</sup> )
-31.03.95	0	0
-31.05.95	0,1	0,9
-30.06.95	1,9	1,3
-31.08.95	0,9	1,8
-30.09.95	0,2	1,8
-31.10.95	0	0,3
-31.12.95	0	0
-31.03.96	0	0
-30.05.96	1,3	0,5
-30.06.96	1,6	1,3
-31.07.96	1,9	1,4
-31.08.96	1,7	1,4
-30.09.96	0,5	1,8
-31.10.96	0,3	0,6
-31.12.96	0	0,1

Veden lämpötilat (°C)

aika\syvyys	0-1	1-3	3-6	6-10	10-12	12-15	15-25	25-30	30 -35	35 - 40 m
16.01.- 3.05.	0,5	1,9	2,9	2,4	2,2	1,8	1,4	1,4	1,4	1,4
4.05.-30.05.	7,0	7,0	7,0	4,3	2,5	2,2	1,5	1,5	1,5	1,5
31.05.-22.06.	15,0	15,0	15,0	8,5	5,0	4,2	2,5	2,5	2,5	2,5
23.06.-20.07.	16,6	16,5	16,5	9,8	7,0	5,5	3,2	3,2	3,2	3,2
21.07.-15.08.	20,0	19,0	18,0	10,2	6,6	5,5	3,6	3,6	3,6	3,6
16.08.-30.09.	16,0	16,0	16,0	10,0	7,0	6,0	4,0	4,0	4,0	4,0
1.10.-30.10.	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	5,0	3,0	3,0	3,0	3,0
31.10.-30.11.	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0	3,0
1.12.-15.01.	2,5	2,9	2,9	2,5	2,5	2,5	2,4	2,4	2,4	2,4

Tulovesien happi ja BOD, ks. taulukko 9.

d) Lämpötilariippuvuuksia (Frisk ja Nyholm 1980)

- aT = jyrkin (eli jäätymispisteen, 0 °C:n) riippuvuus  
bT = jyrkkyyden muutos lämpötilan mukana  
To = niistä seuraava vahvimman vaikutuksen lämpötila  
To = (I<sup>1/2</sup> - aT)/bT

Vuorovaikutus	aT(I <sup>1/2</sup> )	bT(°C <sup>-1</sup> I <sup>1/2</sup> )	To (°C)
BOD:n väheneminen	1,12	-0,004	30
BOD:n vajoaminen	1,047	0	—
Pohjan hapenkulutus	1,125	-0,0027	46,3
Suolan vajoaminen	1,08	0	—
Ilmastuminen	1(m vrk <sup>-1</sup> )	0	—

## Vertailu mittaustuloksiin

Kuvassa 63 on mitattuja ja laskettuja happipitoisuuksia verrattu keskenään kahdesta kerroksesta kussakin kuvassa. Mitattu pitoisuusvaihtelu tulee laskentatuloksissa pääpiirteissään hyvin esiin.

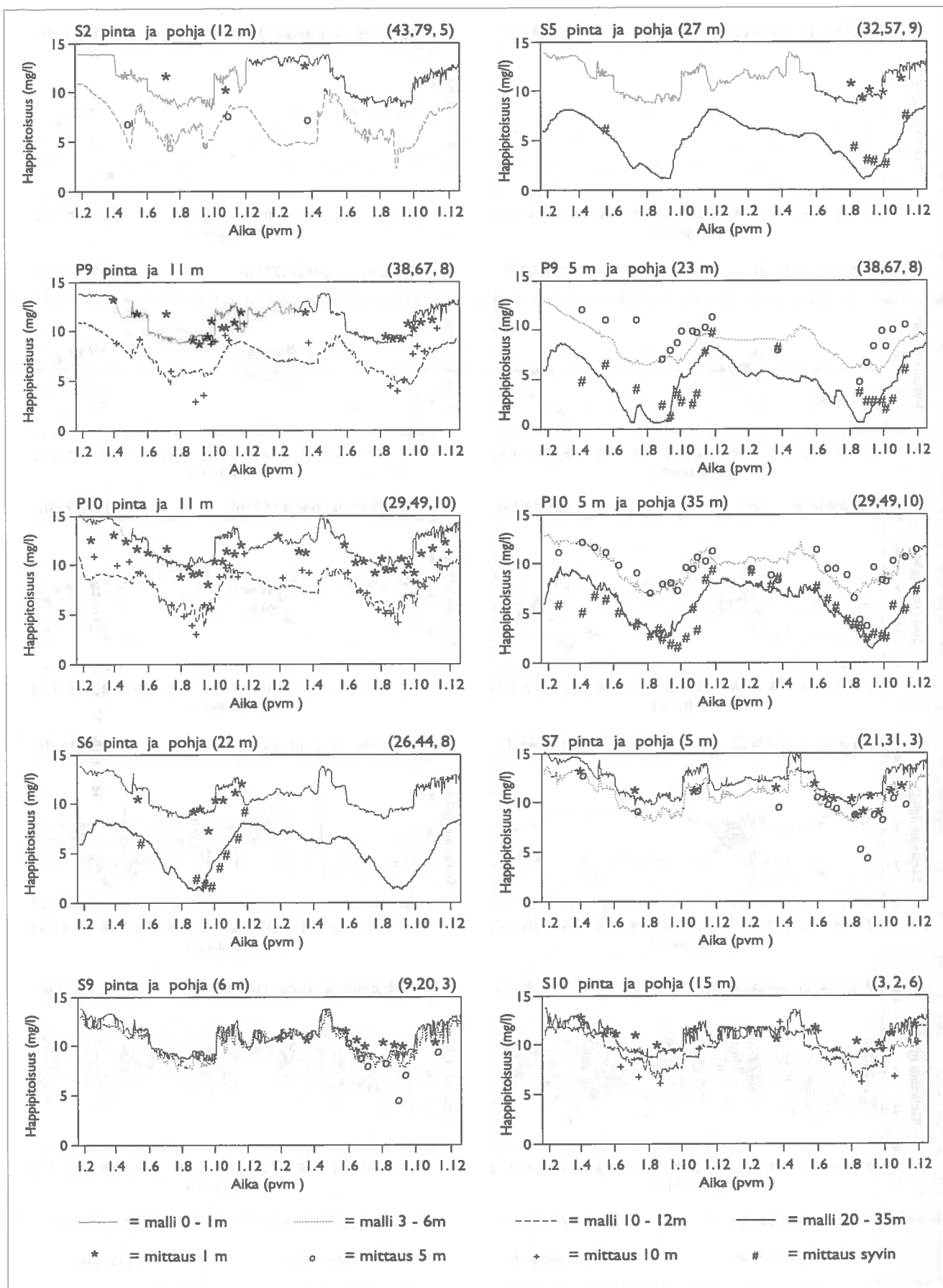
Alkuvaiheen eroihin voivat keskeisimmin vaikuttaa osaltaan alkutilan biologisen hapenkulutuksen lähtöarvojen epätarkkuudet sekä tuulten ja vedenkorkeuksien poikkeaminen tuolloin vallinneista. Alkuvuoden 1995 olosuhteiden käyttöön ja koontiin ei alun perin varauduttu, joten lokakuun alkuun 1995 käytettiin laskennan syöttötietoina vuoden 1996 vastaavan ajankohdan tuulia ja vedenkorkeusvaihteluja.

Kaiken kaikkiaan lasketut happipitoisuudet selittivät mittaustulosten vaihteluista lähes 80 %. Kun otetaan huomioon havaintojen lukuisuus sekä laskenta-perusteen yhtenäisyys, on selitysaste erittäin vakuuttava. Lyhyemmillä jaksoilla esiintyi yli 90 prosentinkin selitysasteita.

Hapen perusrippuvuuden luonnonmukainen kuvautuminen perustuu yhtäältä virtausten ja kulkeutumisen laskennan suhteelliseen osuvuuteen sekä toisaalta hapen kyllästyspitoisuuden riippumiseen veden lämpötilasta. Syöttötietoina annetut toisen vaiheen ja sisäisen kuormituksen aikariippuvuudet eivät selitä happitilanteen kohenemista syys-lokakuulla, koska kuormitukset on syötetty jatkumaan melko väkevinä marraskuulle saakka.

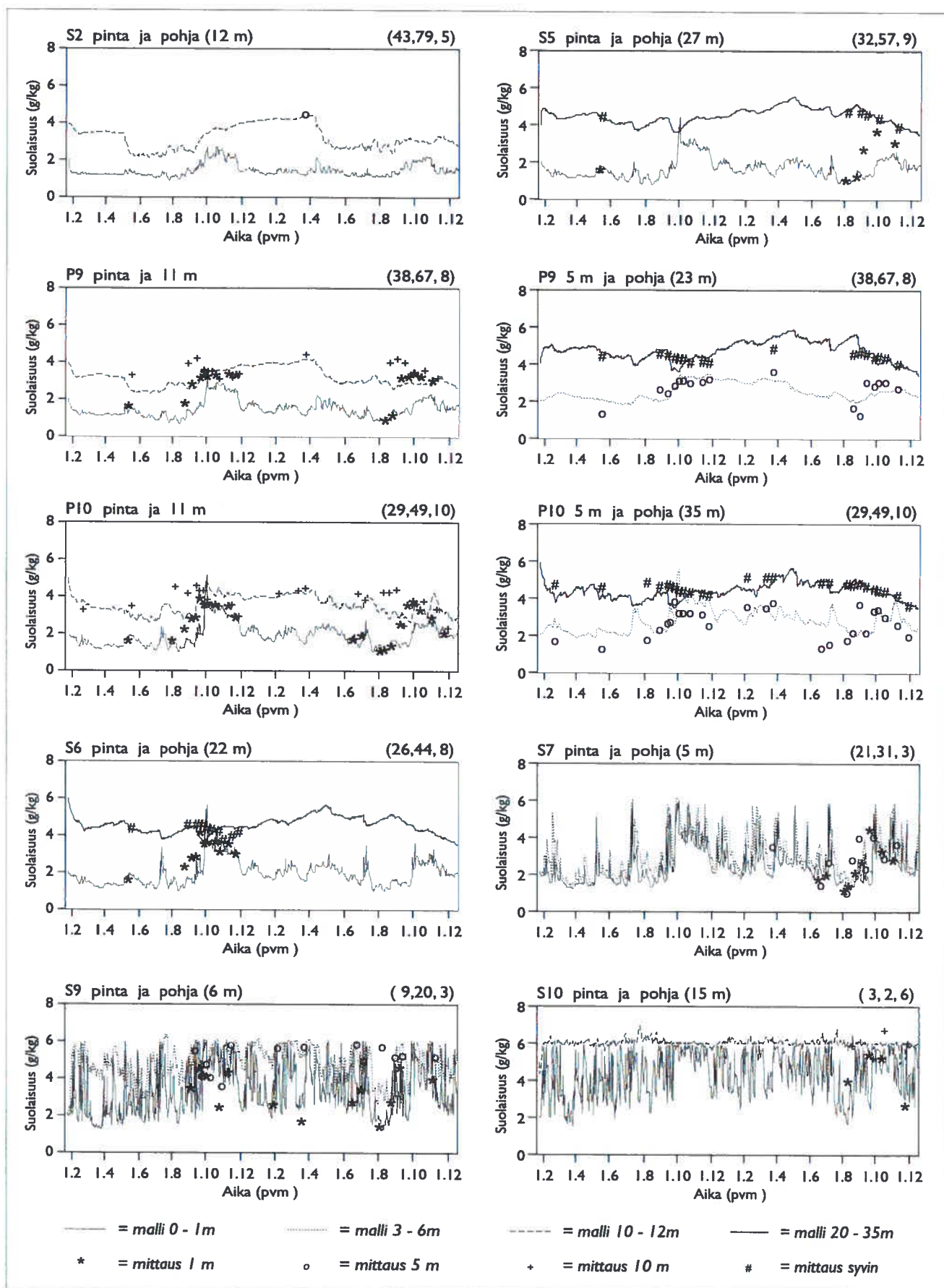
Suolapitoisuuksissa (kuva 64) kulkeutumisen vaikutus tulee esiin vielä selvemmin kuin happipitoisuuksissa, koska suolaisuuden kaikki sisään- ja ulosvirtaus tapahtuu tarkastelualueen eteläreunan kautta. Vertailua mittaustuloksiin rajoittaa vakiopitoisuuksien käyttö reuna-arvoina. Tästä huolimatta selitysasteet nousevat yli 50 %:iin.

Erotustarkkuuden rajallisuus (200 metriä) – siitä kulkeutumiskuvaukseen aiheutuvina pyöristävinä likimääräisyyksinä – vaikuttaa suolapitoisuuksiin enemmän kuin happipitoisuuteen, koska suolapitoisuuden kaikki lähteet ja nielut ovat reunalla, pitkän kulkeutumismatkan päässä tarkastelun ydinalueilta. Kulkeutumisvaikutuksista selvimpiä tällä erotustarkkuudella on mataloituneiden kynnysten vaikutus alusveden suolapitoisuuksien laimentumiseen aika ajoin.



Kuva 63. Mitatut (erillismerkkeinä \*, o, + ja #) ja lasketut (esitetty viivoina) happipitoisuudet havainto- ja tulostuspisteiden s2, s5, p9, p10, s6, s7, s9 ja s10 eri syvyyksiltä vuosina 1995–96.





Kuva 64. Mitatut (erillismerkkeinä o, \*, +, #) ja lasketut (esitetty viivoina) suolapitoisuudet havainto- ja tulostuspisteiden s2, s5, p9, p10, s6, s7, s9 ja s10 eri syvyyksiltä vuosina 1995–96.

### 3.4.3 Päälyllysveden pumppauksen vaikutus

Alusveteen pumpatun päälyllysveden vaikutuksia laskettiin vertaamalla pumpuitta tuloksiksi saatuja happi- ja suolapitoisuuden jakaumia ja aikasarjoja vuosien 1995–96 pumppujen kanssa laskettuihin (esim. kuvien 63 ja 64) vastaaviin tuloksiin. Hapipitoisuuden aikasarjojen vertailuja on koottu kuvaan 65. Pumppauksen aloitus osui syksyllä 1995 yksiin mereltä tulleen hapekkaan veden runsaan virtauksen kanssa. Syksyllä 1996 pumppaus aloitettiin puolestaan hapipitoisuuden useimmissa kohdin jo ehdittyä vähimmäistasolleen. Pumppaus ei näin ollen näy paljontaan vaikuttaneen matalimpiin hapipitoisuuksiin. Sitä vastoin se varsin selvästi lyhensi lähes hapettomien olojen kestoa – enimmillään puolestatoista kuukaudesta vajaaseen viikkoon – pohjan lähellä kohtuullisen laajalla alalla pisteiden S4–S6 ympäristössä (p9 on sama kuin s4 ja p10 sijaitsee s5:n ja s6:n välissä).

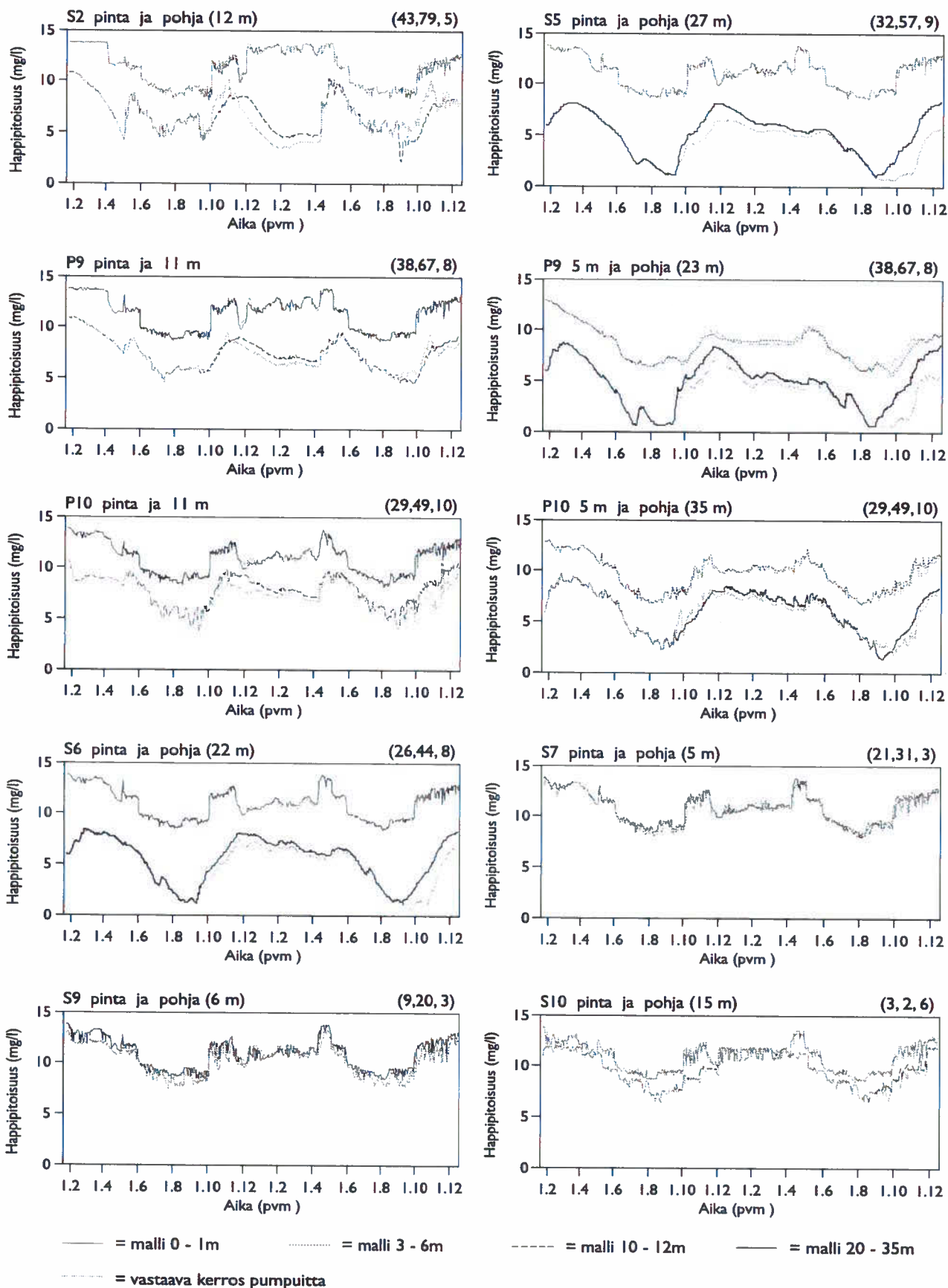
Pumppauksen vaikutus näkyy hapipitoisuuden kohenemisena varsin kauan, läpi talven, vaimeten ajan mukana aina seuraavan kesän alkuun saakka. Hetkittäin etenkin pumppauksen alkuvaiheissa 1995 pisteissä s2 ja p10 saattoi pumppaus myös sekoittaa vähähapimpia vesiä tulostuspisteeseen. Päälyllysveden pitoisuuksiin pumppaus ei juuri vaikuttanut.

Suolapitoisuuksiin pumppaus vaikutti hitaammin ja vähemmän kuin hapipitoisuuksiin (kuva 66). Syksyllä 1995 näkyvät vaikutukset rajoittuivat lähinnä pisteen p9 (eli s4) pohjan lähelle. Syksyllä 1996 vaikutus samassa pisteessä oli lähes 1 g kg<sup>-1</sup>. Tuolloin vaikutus erottui selvänä laskentajakson loppuun asti, joulukuun lopulle. Etelämpänä vaikutus oli vähäisempää (s5) tai lyhytaikaisempaa (p10, s6). Reunamien alusveteen pumppaus näkyi levittävän suolaisempaa vettä kuin sinne muuten päätyisi (s2). Päälyllysveteen pumppauksen vaikutus ei juurikaan ulottunut.

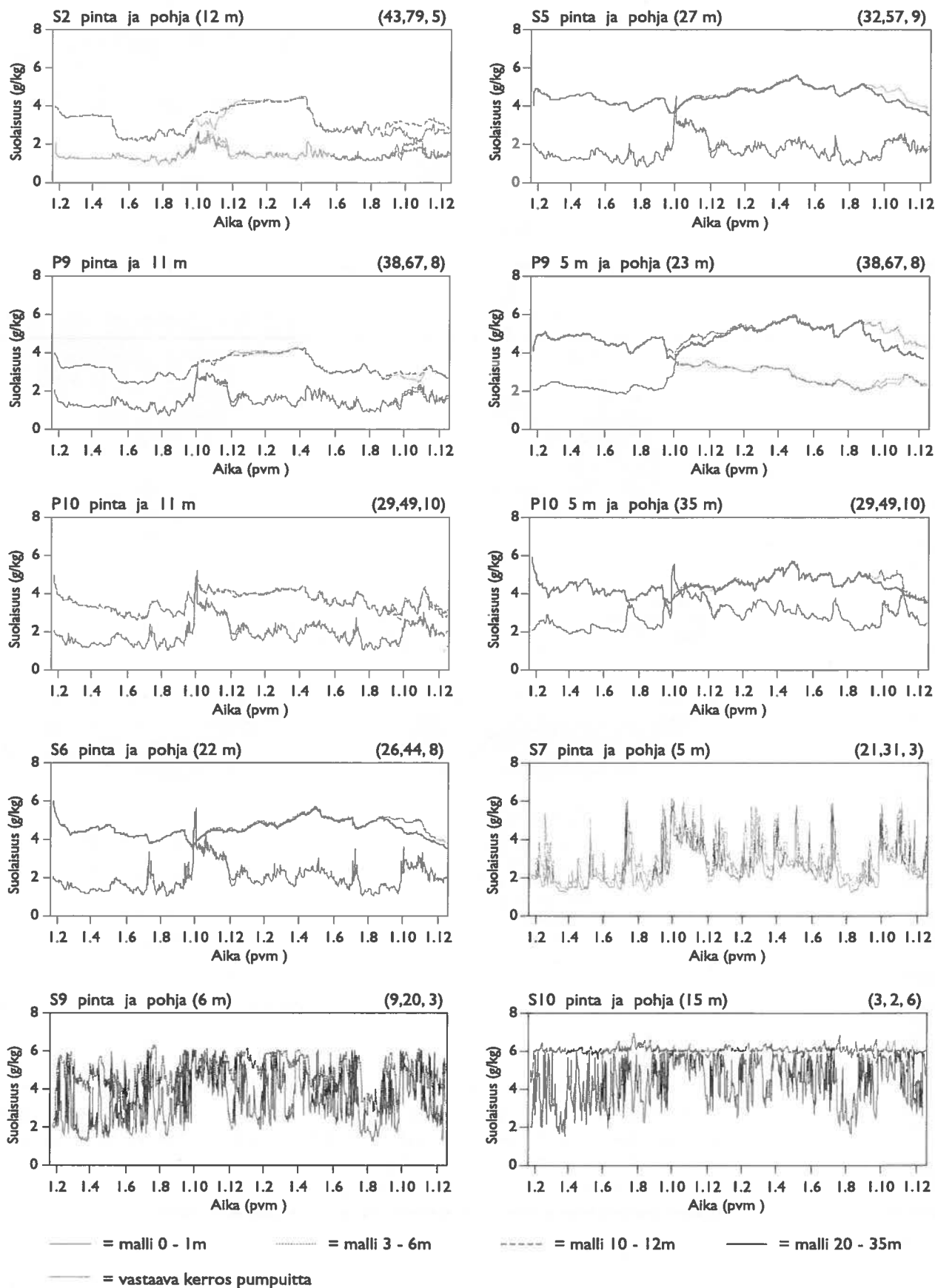
Pumppujen vaikutustapaa havainnollistamaan on kuvaan 67 laskettu esimerkkejä jyrkän suolakerrostuksen muuttumisesta seisovaan veteen aloitetun pumppauksen jälkeen. Lähtötilassa on 15 metrin yläpuolella suolapitoisuus ollut 2 g kg<sup>-1</sup> ja alapuolella 6 g kg<sup>-1</sup>. Lähtötilan jälkeen pumppaus on ollut ainoa virtauksia aiheuttanut tekijä. Kuvasta näkyy, miten pohjan lähelle pumpattu vähäsuolaisena kevyt päälyllysvesi sekoittui pumppauskohdan vesiin ja ympäristöään kevyempänä nousi alusveden ylärajoille ja siitä edelleen joka suuntaan sivuille.

Esimerkki vaihtelevista tilanteista on syyskuun lopulta 1995, jolloin pumppujen vaikutus suolaisuuteen oli likimain suurimmillaan ja ulottui laajimmalle. Kuvan pystyleikkauksessa P–P suolaisuudeltaan yli 4,5 g kg<sup>-1</sup> vesi on 15 ja 25 metrin väliltä laimentunut 4–4,5:een g kg<sup>-1</sup>.

Hapipitoisuuksiin pumppaus vaikutti jonkin verran enemmän kuin suolapitoisuuksiin. Ääriesimerkkejä tästä on koottu kuvaan 68 lokakuun lopulta 1996, jolloin pumppauksen vaikutukset hapipitoisuuksiin olivat likimain suurimmillaan ja laajimmalle ulottuneita.

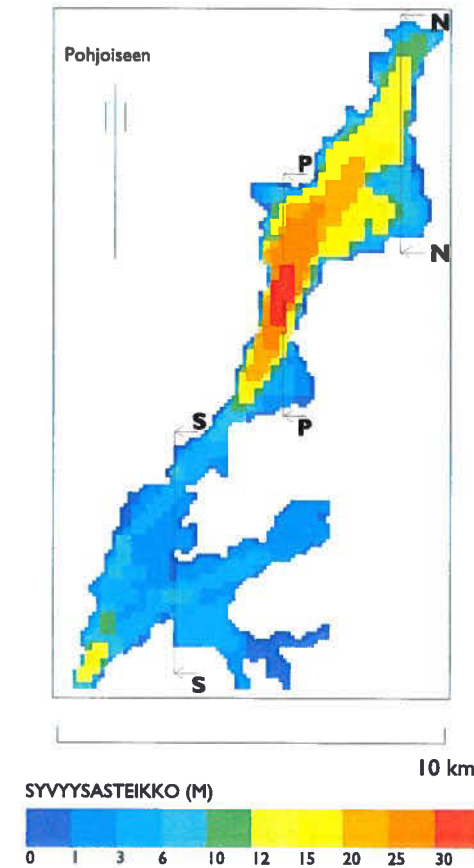


Kuva 65. Pumppauksen vaikutus mittaus- ja tulostuspisteiden s2, s5, p9, p10, s6, s7, s9 ja s10 eri vesikerrosten happipitoisuuksiin syksyllä 1995 ja 1996 (ehyet viivat ja katkoviivat pumpattuina, pisteviiva pumpuitta).

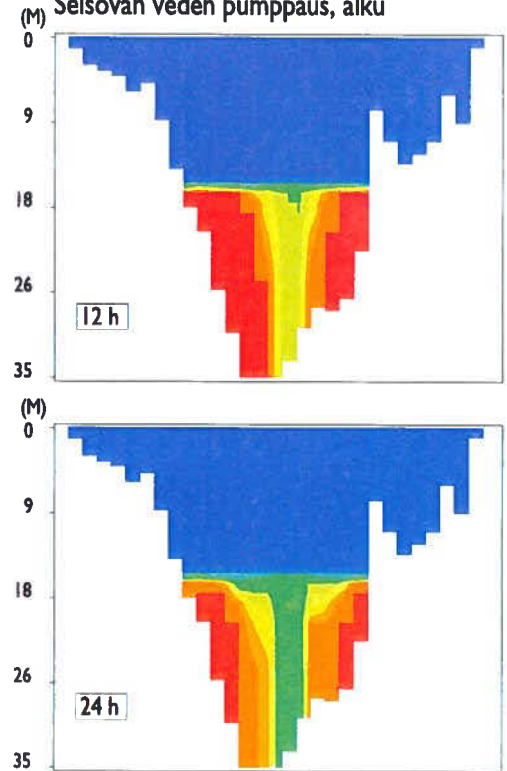


Kuva 66. Pumppauksen vaikutus mittaus- ja tulostuspisteiden s2, s5, p9, p10, s6, s7, s9 ja s10 eri vesikerrosten suolaisuuksiin syksyllä 1995 ja 1996 (ehyet viivat ja katkoviivat pumpattuina, pisteviiva pumpuitta).

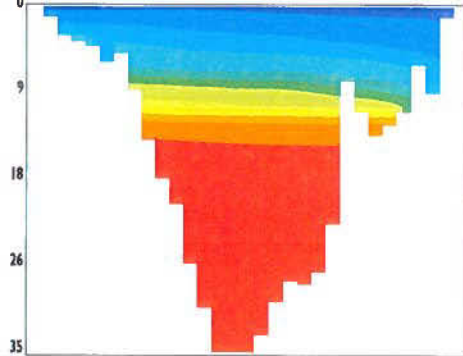
## Syvyudet ja pystyleikkauslinjoja



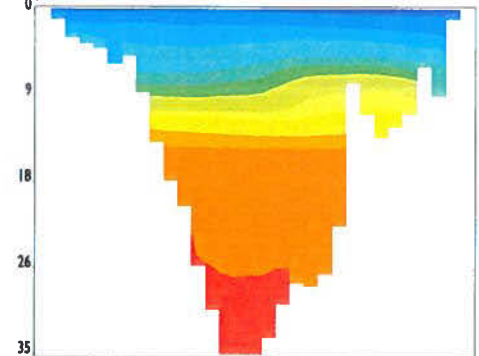
## Seisovan veden pumppaus, alkua



## LEIKKAUS P – P PUMPUITTA 27.9.1996



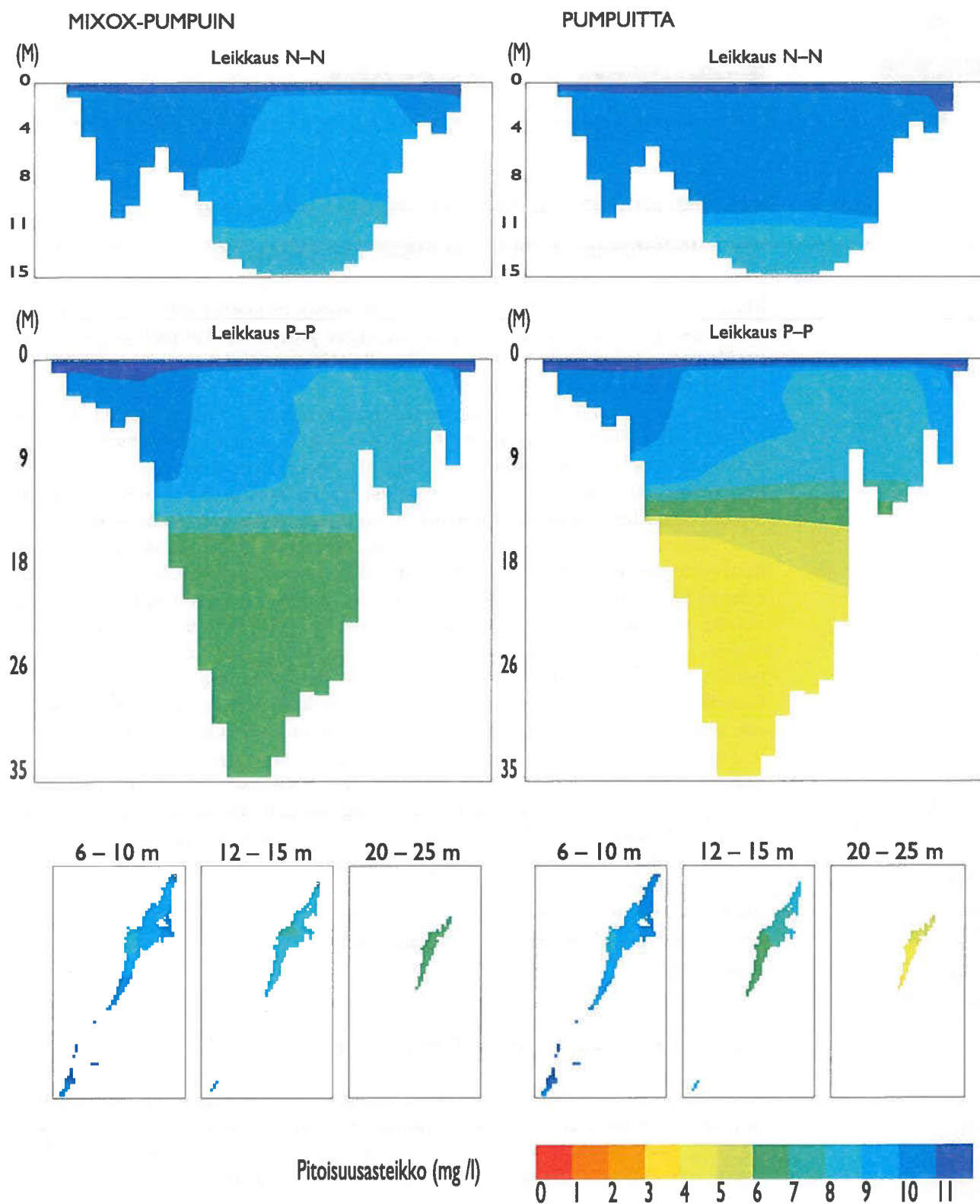
## LEIKKAUS P – P MIXOX-PUMPUIN



Kuva 67. Pohjapitäjänlahden laskenta-alueen pohjan syvyys ja pystyleikkauslinjat (vasemmalla ylhäällä). Mixox-pumppauksen jyrkästi kerrostuneeseen seisovaan veteen aluksi aiheuttamia suolapitoisuuden pystyleikkauksia linjalta P – P (oikealla ylipinä, huom. alusveden pitoisuusasteikon kohdistus välille 5,7–6 g kg<sup>-1</sup>); sekä pumpuitta (alavasemmalla) ja pumppattuna (alaoikealla) lasketut yhden tilanteen pystyleikkaukset. Syvyyksille ja suolaisuuksille käytettyjen värien merkitys on selitetty kunkin osakuvan alapuolella.



Hapen pystyleikkauksia ja vaakajakaumia 27.10.1996



Kuva 68. Pystyleikkausten N – N ja P – P (kuva 67) sekä neljännen, kuudennen ja kahdeksannen laskentakerroksen happipitoisuuden jakaumia lokakuun lopulla 1996 mixox-pumpuin (vasemmalla) ja pumppauksitta (oikealla) laskettuina.



# 4

## Tulosten tarkastelu

### 4.1 Pohjanpitäjänlahden veden vaihdunta

#### 4.1.1 Vaihdunnan ja kerrostumisen vuorovaikutus

Meritieteessä mereen yhteydessä oleva jokisuisto, estuaari määritellään puoliksi suljetuksi rannikkovesialueeksi, jolla on vapaa yhteys ulkomereen ja jossa merivesi laimenee merkittävästi valuma-alueelta tulevaan makeaan veteen (Pritchard 1952, Pickard ja Emery 1964).

Estuaarit luokitellaan veden ominaisuuksien jakautumisen mukaan neljään pääluokkaan (Stommel, ks. Dyer 1973): 1. pystysuunnassa sekoittuneisiin (vertically mixed), 2. heikosti kerrostuneisiin (slightly stratified estuaries), 3. voimakkaasti kerrostuneisiin (highly stratified estuaries) ja 4. kiilamaisesti kerrostuneisiin (salt wedge estuaries). Pohjanpitäjänlahti on voimakkaasti kerrostunut estuaari.

Makea jokivesi, joka tulee estuaariin, sekoittuu jossain määrin suolaiseen meriveteen ja virtaa pintakerrosta pitkin vähitellen ulkomerelle. Korvaava sisäänvirtaus sijoittuu pintakerroksen alapuolelle. Sisään- ja ulosvirtaus ovat dynaamisesti yhteydessä niin, että kun kasvava jokivirtaama laimentaa suiston suolaisuutta, se samalla aiheuttaa kasvavaa meriveden sisäänvirtausta, joka pyrkii nostamaan suolaisuutta. Näiden välille pyrkii muodostumaan tasapainotila. Estuaarikierto on riippuvainen mm. kynnyksen korkeudesta, jokivirtaamasta ja rannikkoalueen tiheysjakaumasta ts. kerrostumisesta. Jos kynnyks on niin matala, että se tunkeutuu matalasuolaiseen pintakerrokseen, estuaarin vedenkierto ei pääse kehittymään ja suolaisen veden virtaus sisään päin halokliinin alla ei tapahdu kunnolla, eikä alusvesi vaihdu säännöllisesti. Tämä on tyypillistä Pohjanpitäjänlahdelle, jossa Tammisaaren ja Vitsandin välinen pitkä ja matala salmien ja saariston muodostama kynnyks estää normaalin veden vaihdon lahden ja rannikkoalueen välillä. Jos kynnyks olisi syvempi kuin halokliini, alusveden vaihdunta olisi nopeaa ja riippuvuus jokivirtaamasta selvempi. Estuaari-kierto tulisi erityisesti ottaa huomioon tarkasteltaessa jätevesipäästöjen vaikutuksia rannikkoalueella.

#### 4.1.2 Vaihdunnan suuruus Tammisaaren salmissa

Jo vuosina 1911 ja 1912 Witting (1914) havaitsi Pohjanpitäjänlahden alusveden uudistuvan talven aikana, mutta vaihdunnan olevan muuten hyvin vähäistä. Vuosina 1995–1997 tehtyjen virtausmittausten perusteella merivesi virtasi keskimäärin  $21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ulospäin Tammisaaren salmissa. Pohjanläheisessä kerroksessa merivesi virtasi keskimäärin  $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  sisäänpäin (kuva 69). Sisäänvirtaus oli vähäistä valuma-aluevirtaamaan verrattuna (16 %) Tammisaaren ja Vitsandin välisen matalan kynnyksen takia. Sisäänvirtaus oli selvästi pienempi kuin mitä Virta (1977) arvioi kesäkuukausien sisäänvirtaamaksi vuosina 1972–1974 ( $19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  sisäänpäin pohjan läheisessä vesikerroksessa ja  $35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ulospäin pintakerroksessa). Talvella vuonna 1996 tiheysvirtaus pohjanläheisessä kerroksessa oli jonkin verran suurempi. Loppusyksyä ja talvea lukuunottamatta pohjanläheisessä kerroksessa sisäänpäin virtaava merivesi oli syvänteen alusvettä kevyempää eikä

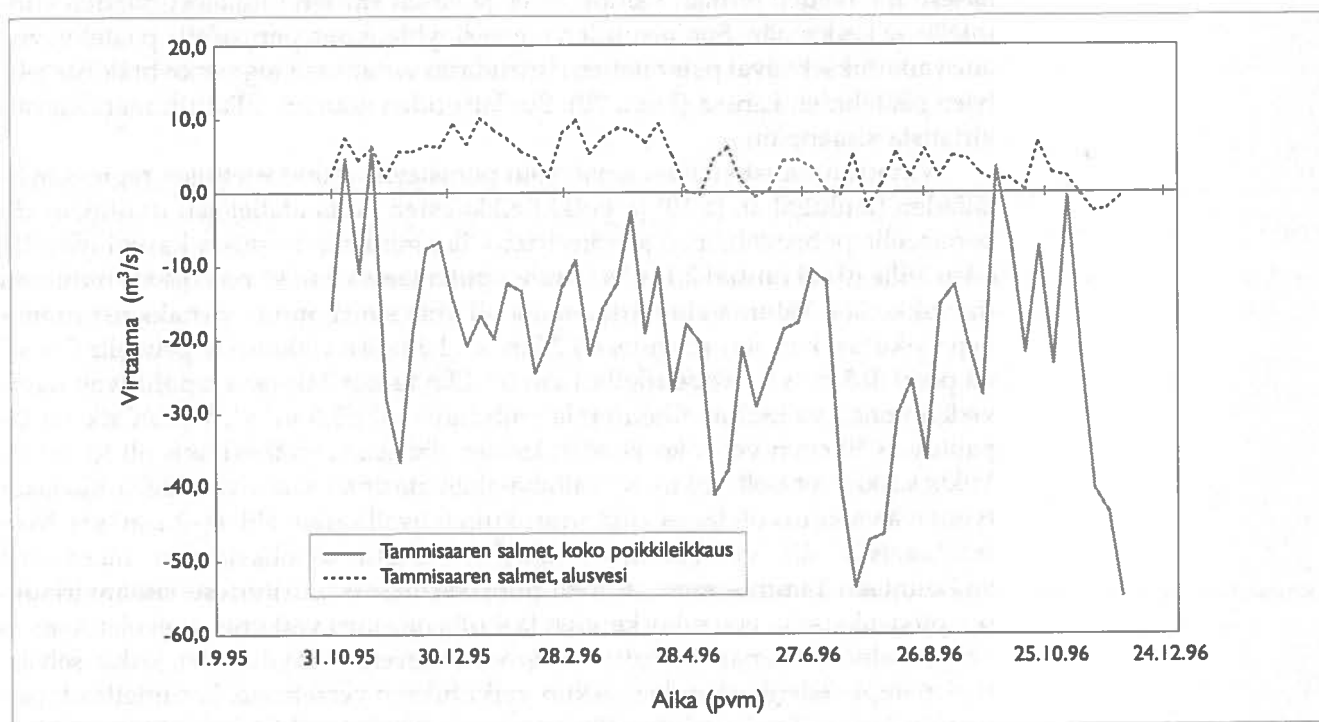
vaikuttanut lahden alusveden vaihduntaan. Kokonaisvaihdunta Tammisaaren salmissa oli vuosina 1995 ja 1996 keskimäärin  $\pm 42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ( $32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  sisään ja  $53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ulos). Mitattu vaihdunta oli jonkin verran pienempi Stipan (1994 ja 1996 a) vedenkorkeusvaihteluiden perusteella arvioimaa vaihduntaa  $\pm 65 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (jota jokivirtaama kääntää  $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  ulospäin), mutta selvästi isompi kuin Launiaisien (1972) ennen laivaväylän rakentamista arvioima vaihdunta ( $\pm 27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , joka vastaa  $4 \text{ cm s}^{-1}$  virtausnopeutta Tammisaaren salmissa).

#### 4.1.3 Tammisaaren ja Vitsandin salmien vaihduntaa säätelevät tekijät

Sekä kolmen tunnin että viikon keskiarvoilla tehty regressioanalyysi osoitti vedenkorkeuden vaihtelun ja valuma-aluevirtaaman olevan merkittävimmät Tammisaaren salmissa pinnan ja pohjan läheistä virtausta selittävät muuttujat. Tuulen välitön vaikutus vaihduntaan Tammisaaren salmissa oli vähäisempi kuin vedenkorkeuden muutosten ja valuma-aluevirtaaman. Vitsandissa sen sijaan, tuuli oli selvästi merkittävämpi virtausta selittävä tekijä kuin Tammisaaressa.

Regressioyhtälöiden vakiokertoimien perusteella estuaari-kierto ts. pinta-kerroksen virtaus ulos ja pohjakerroksen virtaus sisään, on hyvin jatkuvaluontoista valuma-aluevirtaaman, vedenkorkeusvaihteluiden ja tuulen aiheuttamista häiriöistä huolimatta. Tämä on nähtävissä myös viikokeskiarvojen aikasarjassa (kuva 69).

Vedenpinnan vaihtelu saa lyhyellä aikavälillä meriveden virtaamaan edestakaisin molemmissa salmissa. Meriveden lasku sai veden virtaamaan ulos ja nousu sisään. Spektrianalyysi osoitti virtauksen heilahtelevan samaan tahtiin Suomenlahden pinnan kanssa. Heilahtelun aallonpituus oli noin 12 tuntia. Tämä vastaa Virran (1978) määrittämää Suomenlahden vuorovesi-ilmiöön liittyvää virtaaman vaihtelua. Muut Virran havaitsemat jaksot olivat 16 tuntia (altaan ominaisheilahtelu) ja 24 tuntia (tuulen nopeuden vuorokausivaihtelu). 12 tunnin jak-



Kuva 69. Virtaaman viikokeskiarvot (nettovirtaama) mittausjaksolla Tammisaaren salmien koko poikkileikkauksessa ja pohjanläheisessä kerroksessa erikseen.

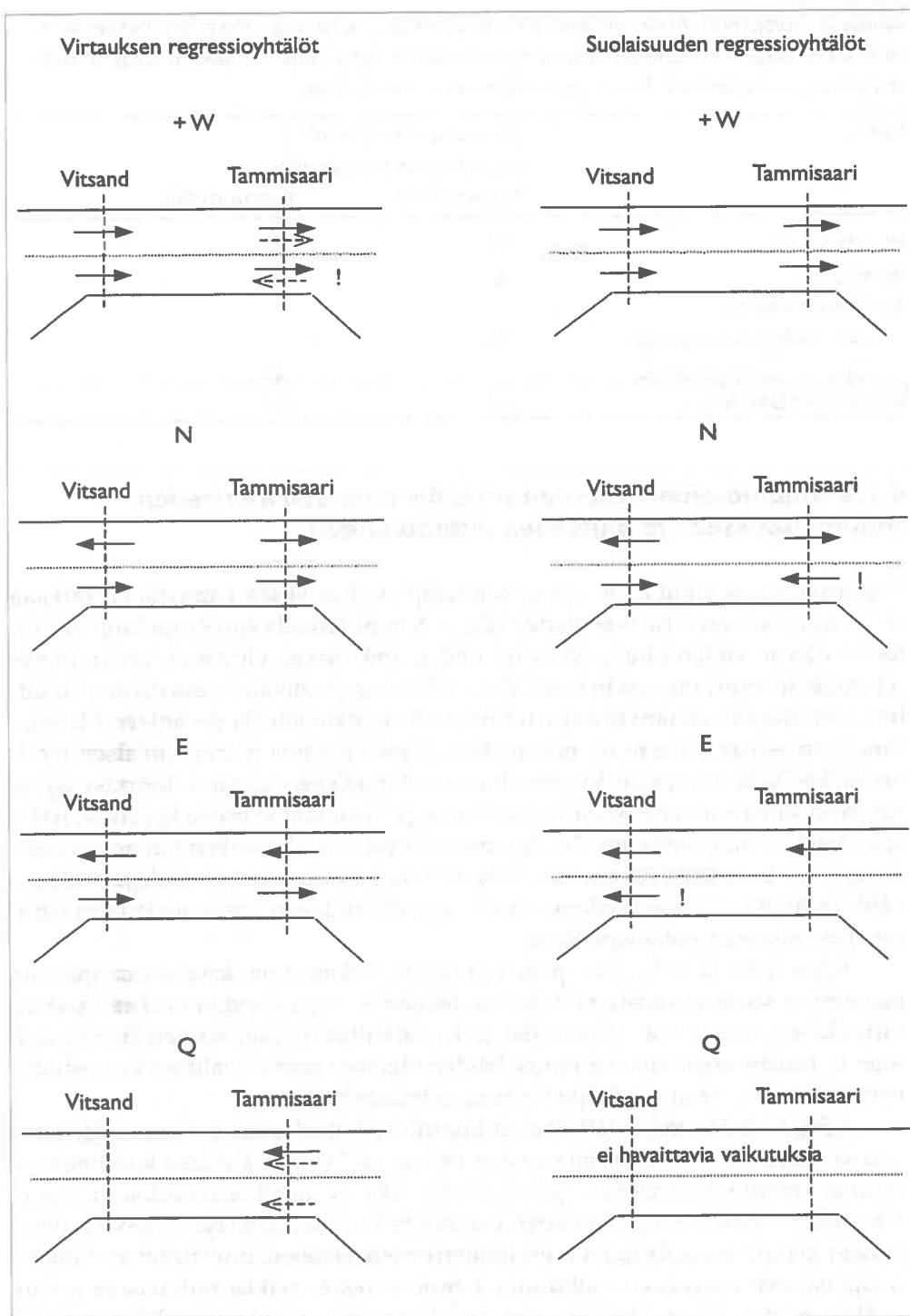
sossa tapahtuva heilahtelu kuljettaa tehokkaasti merivettä saaristovyöhykkeeltä Vitsandin salmen läpi Tammisaaren selälle ja siitä edelleen Tammisaaren salmien läpi Pohjanpitäjänlahdelle sekoittaen altaiden vesimassoja keskenään. Toisaalta pidemmän aikavälin (viikko) kuluessa tapahtuva vedenpinnan lasku synnyttää alusveteen sisäänvirtauksen, jolla on oma vaikutuksensa lahden alusveden vaihduntaan.

Valuma-alueelta tuleva virtaama oli keskimäärin  $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Sillä on vaihduntaan kaksisuuntainen vaikutus. Toisaalta sen aiheuttama tiheysero on estuaari-kiertoa ylläpitävä voima, toisaalta noustessaan riittävän suureksi se hidastaa matalan ulkokynnyksen kohdalla meriveden sisäänvirtausta pohjakerroksessa tai jopa estää sen.

Sekä Tammisaaren että Vitsandin salmissa tuuli oli lyhyellä aikavälillä merkittävin suolaisuuden vaihtelun selittäjä. Vedenkorkeusvaihtelulla oli vastaavasti vähäisempi merkitys. Valuma-aluevirtaama ei juurikaan vaikuttanut suolaisuuteen lyhyellä aikavälillä.

Alusveden syksyisen happitilan kehityksen ja veden vaihdon kriittisin vaihe ajoittuu alkutalven kerrostumattomaan aikaan (syyskuun alusta joulukuun alkuun). Virtausmittausten tilastoanalyysi osoitti, että tällöin otollisimmat olosuhteet suolaisen meriveden sisäänvirtaukselle Tammisaaren salmien pohjan läheisessä kerroksessa oli silloin, kun valuma-aluevirtaama on pieni, tuuleen sisältyy pohjoisen tai idän suuntainen komponentti ja vedenpinta on vähintään viikon laskusuunnassa (kuva 70). Vedenpinnan vaihtelun aiheuttama edestakainen meriveden liike lisäsi vaihduntaa koko poikkileikkauksessa. Vitsandissa vedenpinnan nousu sekä etelätuuli kerrostumattomaan aikaan ja länsituuli kerrostumisesta riippumatta työnsivät pintavirtausta sisäänpäin. Näin ollen syksyn lounaismyrskyt voivat edesauttaa suolaisen meriveden siirtymistä saaristosta Tammisaaren selälle, josta se edelleen tuulen kääntyessä pohjoiseen ja valuma-aluevirtaaman ollessa pieni kulkeutuu Tammisaaren salmien pohjakerroksessa lahti-alueelle. Toisaalta myös pohjois- ja itätuuli työnsivät kerrostumisesta riippumatta pohjavirtausta Vitsandissa sisään. Meriveden tunkeutuminen syksyllä ulkosaaristosta Tammisaaren selän kautta lahtialueelle tapahtuu jossain määrin vaihteeltaisesti meriveden pinnan vaihdeltaessa ja vastakkaisten tuuliolosuhteiden vuorottellessa keskenään. Suolaisuuden regressioyhtälöiden perusteella päätelty virtausvaikutukset olivat paikoitellen ristiriidassa virtauksen regressioyhtälöistä tehtyjen päätelmien kanssa (kuva 70). Suolaisuuden nousun tulkittiin merkitsevän virtausta sisäänpäin.

Virtausmittausten tilastoanalyysin perusteella muodostettujen regressioyhtälöiden (taulukot 16 ja 19) ja poikkileikkausten pinta-alatietojen (taulukko 15) perusteella pohjanläheinen sisäänvirtaus Tammisaaren salmissa kasvoi lyhyellä aikavälillä (0–15 tuntia)  $2,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  tuulen puhaltaessa  $5 \text{ m s}^{-1}$  pohjoisen suunnasta (taulukko 26). Valuma-aluevirtaamalla oli yhtä suuri, mutta vastakkaissuuntainen vaikutus, kun sen suuruus oli  $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Itätuulen vaikutus nopeudella  $5 \text{ m s}^{-1}$  oli pieni ( $0,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Nopeudella  $1 \text{ cm h}^{-1}$  12:n tunnin jaksossa tapahtuvan merivedenpinnan vaihtelun aiheuttama vaihdunta oli  $\pm 5,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Viikon aikana tapahtuvan 50 cm:n vedenkorkeuden laskun aiheuttama sisäänvirtaus oli  $6,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Viikkokeskiarvotasolla  $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  valuma-aluevirtaaman sisäänvirtaamaa ulospäin työntävä vaikutus oli lähes yhtä suuri kuin lyhyellä aikavälillä ( $-2,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Normaalioloissa siis vedenkorkeusvaihtelu vaikutti tehokkaimmin meriveden vaihduntaan Tammisaaren salmien pohjakerroksessa. Erityisesti sisäänvirtauksen pitkäaikaisella vedenkorkeuden laskulla oli suuri vaikutus. Pohjoistuulen ja valuma-aluevirtaaman vaikutus sisäänvirtaukseen oli myös suuri, joskin selvästi pienempi vedenkorkeuden laskun vaikutuksiin verrattuna. Itätuulella oli pieni vaikutus sisäänvirtaukseen Tammisaaren salmien pohjakerroksessa.



Kuva 70. Eri ympäristötekijöiden vaikutus veden vaihduntaan Tammisaaren (länsi) ja Vitsandin salmissa syksyn kerrostumattomaan aikaan virtausnopeuden ja suolaisuuden regressioyhtälöiden kvalitatiivisen tulkinnan perusteella. Yhtenäinen nuoli virtauksen suunta kolmen tunnin keskiarvoilla ja katkoviiva viikkokeskiarvoilla laskettuna. +W = meriveden pinnan nousu, N = tuulen pohjoiskomponentti, E = tuulen itäkomponentti, Q = valuma-aluevirtaama, ! = ristiriita virtaus- ja suolaisuusregression tai kolmen tunnin ja viikon keskiarvojen tulkinnan välillä.



Taulukko 26. Tuulen, vedenkorkeuden muutoksen ja valuma-aluevirtaaman vaikutus meriveden sisäänvirtaukseen Tammissaaren salmien pohjakerroksessa virtausmittausten regressioyhtälöiden (taulukot 16 ja 19) ja poikkileikkausten pinta-ala-tietojen (taulukko 15) perusteella. 3h = 3 tunnin keskiarvo, vk = viikkokeskiarvo.

Muuttuja	Vaikutus sisäänvirtaukseen ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) Tammissaaren salmien pohjakerroksessa	
	3h-regressioyhtälö	vk-regressioyhtälö
Pohjoistuuli, $5 \text{ m s}^{-1}$	2,1	
Itätuuli, $5 \text{ m s}^{-1}$	0,3	
Veden korkeuden muutos		
1 cm $\text{h}^{-1}$ (vaihtelu 12 h:n jaksossa)	$\pm 5,6$	
–50 cm $\text{vk}^{-1}$ (lasku viikon aikana)		6,7
Valuma-aluevirtaama, $20 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$	–2,1	–2,2

#### 4.1.4 Valuma-aluevirtaaman vaikutus suolaisen meriveden sisäänvirtaukseen ja alusveden uusiutumiseen

Loppusyksyn ja alkutalven syvänteen happitäydennyksen kannalta on tärkeää se, mikä on sisään virtaavan veden tiheys. Sen pitäisi olla suurempi kuin syvänteessä olevan veden tiheys. Vuosina 1995 ja 1996 sisään virtaavan veden tiheys oli riittävän suuri enimmänsä osan aikaa lokakuun puolivälistä maaliskuuhun asti. Kesällä sisäänvirtauksen tiheys oli ajoittain lähellä syvänteen tiheyttä. Ilmeisesti estuaari-kierto oli niin heikko, ja jokivirtaama työnsi suolaisen meriveden keväällä niin kauas kynnysalueen eteläpuolelle, että vasta loppusyksystä riittävän suolaista vettä pääsi Tammissaaren ja Vitsandin väliselle kynnysalueelle ja sisään lahtialueelle (kuva 71). Alkutalvella valuma-aluevirtaaman nousu saat-  
taa työntää suolaisen veden väliaikaisesti Tammissaaren eteläpuolelle ja estää syvänteen happivaraston täydentymisen kannalta riittävän tiheän veden virtaamisen Tammissaaren pohjoispuolelle.

Stipa (1994 ja 1996 a) on päättänyt tämän tutkimuksen kanssa samanlaisiin päätelmiin sisäänvirtausta säätelevistä tekijöistä. Stipan arvion mukaan sisäänvirtaukseen vaikuttavat samat asiat, jotka vaikuttavat vesimassojen kerrostumiseen ts. tuulen sekoittava vaikutus, lahden ulkoisen rannikkoalueen kerrostuminen, jokiveden virtaus ja jääpeitteen muodostuminen.

Schinke ja Matthäus (1998) ovat tilastollisesti analysoineet Itämerellä, Tanskan salmissa ja Pohjanmerellä vuosien 1897 ja 1997 välisenä aikana koottuja suolaisuus-, merivedenkorkeus-, jokivirtaama-, sää- ja sadantahavaintoja ja Itämeren sisäänvirtaustilastoja. Itämeren vaihdunta Tanskan salmissa on käyttäytynyt jossain määrin samalla lailla kuin Itämeren pienoiskoossa muistuttavan Pohjanpitäjänlahden alusveden vaihdunta Tammissaarella, vaikka mittakaava ja olosuhteet ovat erilaiset. Sisäänvirtauksen ajoitus on samanlainen. Pohjanpitäjänlahdella se ajoittuu pääasiassa loka–huhtikuun väliseen aikaan. Pohjanmeren suolaisen meriveden sisäänvirtaus Tanskan salmista tapahtuu elo–huhtikuun välisenä aikana. Sisäänvirtauksesta 90 % ajoittuu loka–helmikuun väliseen aikaan. Pohjanpitäjänlahden alusveden talviaikainen vaihdunta tapahtuu kuitenkin säännöllisesti vuosittain toisin kuin Itämerellä, jossa sisäänvirtaus voi kokonaan puuttua useana vuotena peräkkäin. Pohjanpitäjänlahdella vaihdunnan viivästyminen näkyy heti alkutalven happitilassa, kun taas Itämerellä vaihdunnan puuttumisen vaikutukset näkyvät hitaasti kuukausien ja vuosien kuluessa.

Pohjanpitäjänlahden alusveden syksyisen happitilan trendi kääntyi 80- ja 90-lukujen vaihteessa laskuun. Vastaavasti Itämeren alusveden vaihdunta ja happi-tila ovat olleet erityisen heikkoja 1980- ja 1990-luvuilla.

Molempien tutkimusten perusteella jokivirtaama vaikuttaa sekä Pohjanpitäjänlahden että Itämeren kerrostumiseen jossain määrin samalla lailla pienentäen suolaisen meriveden sisäänvirtausta molemmissa tapauksissa ratkaisevasti. Schinke'n ja Matthäus'in mukaan Itämeren valuma-alueelta tulevien jokivirtaamien vaihtelulla on tuuleen ja ilmanpainevaihteluihin verrattuna aiemmin arvioitua suurempi vaikutus Pohjanmereltä Itämerelle tulevan suolaisen meriveden sisäänvirtaukseen. Tanskan salmissa vallitsevien tuuliolojen ja ilmanpaineen vaihtelun aikaansaama veden vaihto Pohjanmeren ja Itämeren välillä ei yksin selitä Itämeren alusveden vaihdunnan kannalta tärkeää sisään virtaavan meriveden suolaisuuden vaihtelua. Koko Itämeren valuma-alueelta talviaikana tuleva jokivirtaama vaikuttaa paljon Itämeren vesitaseeseen, kerrostumiseen ja päällysveden suolaisuuteen. Esimerkiksi Itämeren suolaisuuden lasku 1980-luvulla johtui jokivirtaaman noususta. Talviaikainen jokivirtaama laimentaa myös Tanskan salmissa sisäänvirtaavan meriveden suolaisuutta. Lisäksi jokivirtaama lisää ulosvirtausta pintakerroksessa pienentäen pohjakerroksessa sisäänpäin suuntautuvaa kompensaatiovirtausta. Sopivien sääolojen vallitessa Tanskan salmissa sisään virtaavaa vesi on vain silloin riittävän suolaista (suolaisuus > 17 PSU) painuakseen Itämeren pohjan läheisiin vesikerroksiin, kun Itämeren jokivirtaama ei ole kovin iso. 1970-luvun puolivälissä vähentynyt sisäänvirtaus ja sisäänvirtauksen puuttuminen vuoden 1983 alusta lähtien vuoden 1993 alkuun asti johtuivat Schinke'n ja Matthäus'in mukaan talviaikaisen jokivirtaaman kasvusta. Vuoden 1993 jälkeenkin sisäänvirtaus Itämerelle on ollut vähäistä.

Itämeren jokivirtaaman kasvu 1980- ja 1990-luvuilla ja siirtyminen talviaikaan oli Schinke'n ja Matthäus'in mukaan seurausta sadannan kasvusta, haihdunnan pienenemisestä ja Ruotsissa ja Suomessa harjoitetusta vesistöjen säännöstelystä. Pohjanpitäjänlahden valuma-alueella jokivirtaamaan vaikuttivat todennäköisesti samat tekijät kuin koko Itämeren valuma-alueella. Tästä on osoituksena Peltokosken talviaikaisen (lokakuusta huhtikuuhun) keskivirtaaman ( $22,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) 40 %:n kasvu vuosina 1980–1998 vertailujakson 1938–1980 talviaikaan keskivirtaamaan ( $15,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) verrattuna (SYKE:n hydrologinen rekisteri). Tämä muutos johtuu pääasiassa vesistön säännöstelystä. Vehviläisen ja Huttusen (1997) SILMU-ilmastonmuutosennusteisiin pohjautuvan valuntaennusteen mukaan Etelä-Suomen talviaikaiset virtaamat (syyskuun alusta maaliskuun loppuun) tulevat kasvamaan nykyisestä 25–60 % vuoteen 2100 mennessä.

## 4.2 Suolan ja hapen pitoisuudet ja taseet

### 4.2.1 Pitoisuusvaihteluihin vaikuttavat hydrologiset tekijät

Suolaisuuden jakauma Tammisaaresta etelään sijaitsevalla alueella vaihtelee jokivirtaaman ja vuodenajan mukaan (kuva 71). Kun virtaama keväällä on iso, suolainen merivesi on Tammisaaren tai Vitsandin kynnysten eteläpuolella. Talvella, kun virtaama on pieni, suolainen merivesi ulottuu kynnysten pohjoispuolelle. Alusveden suolaisuus ei ole kovin homogeeninen estuaarin alueella. Eriytyisesti Tammisaaren pohjoispuolisen lahtialueen alusvesi muodostaa tässä suhteessa oman, muusta estuaari-alueesta erillisen altaan. Pohjanpitäjänlahden pinta- ja alusveden välinen halokliini on ajoittain hyvin voimakas. Talvella kerrostuneisuus jyrkkenee ja siirtyy lähemmäs pintaa. Kesällä harppauskerros on jonkin verran syvemmällä ja loivenee merkittävästi loppusyksyllä sisäänvirtauksen ansiosta. Halokliinissä on pystysuuntaista sekoittumista pääasiassa ylöspäin, hyvin vähän alaspäin. Tämä yksisuuntainen sekoittuminen johtuu pintavirtauksen sekä sisäisten aaltojen päällysy- ja alusveden välille aikaansaamasta leikkaus-



jännityksestä, sisäisten aaltojen murtumisesta ja suolaisen alusveden sekoittumisesta päällysveteen. Aaltojen pohjat eivät murru alaspäin eivätkä kuljeta vähäsuolaista pintavettä alusvedeen.

Koska alaspäin tapahtuva sekoittuminen on vähäistä, Tammisaaren pohjoispuolella alusveden suolaisuus ts. tiheys pienenee vähitellen. Kun suolainen merivesi on siirtynyt Tammisaaren kohdalle, pääsee merivesi virtaamaan lahden alusvedeen tiheyttään vastaavalle syvyydelle ja työntää kevyemmän veden kohden lahden perukkaa, jossa se sekoittuu vähitellen pintakerrokseen ja kulkeutuu ulos lahtialueelta (kuva 71).

Pohjanpitäjänlahden päällysveden suolapitoisuus määräytyy valuma-alueelta tulevan makean veden virtaaman ja meriveden sisäänvirtauksen yhteisvaikutuksesta. Kun valuma-aluevirtaama on suuri, suolainen merivesi ei pääse työntymään Tammisaaren salmista lahden päällysveteen. Tällöin suolaisuus pienenee. Kun taas valuma-aluevirtaama on pieni, työntyy suolainen merivesi tiheyserojen, tuulen ja vedenkorkeusvaihteluiden vaikutuksesta lahtialueelle ja suolaisuus siellä kasvaa.

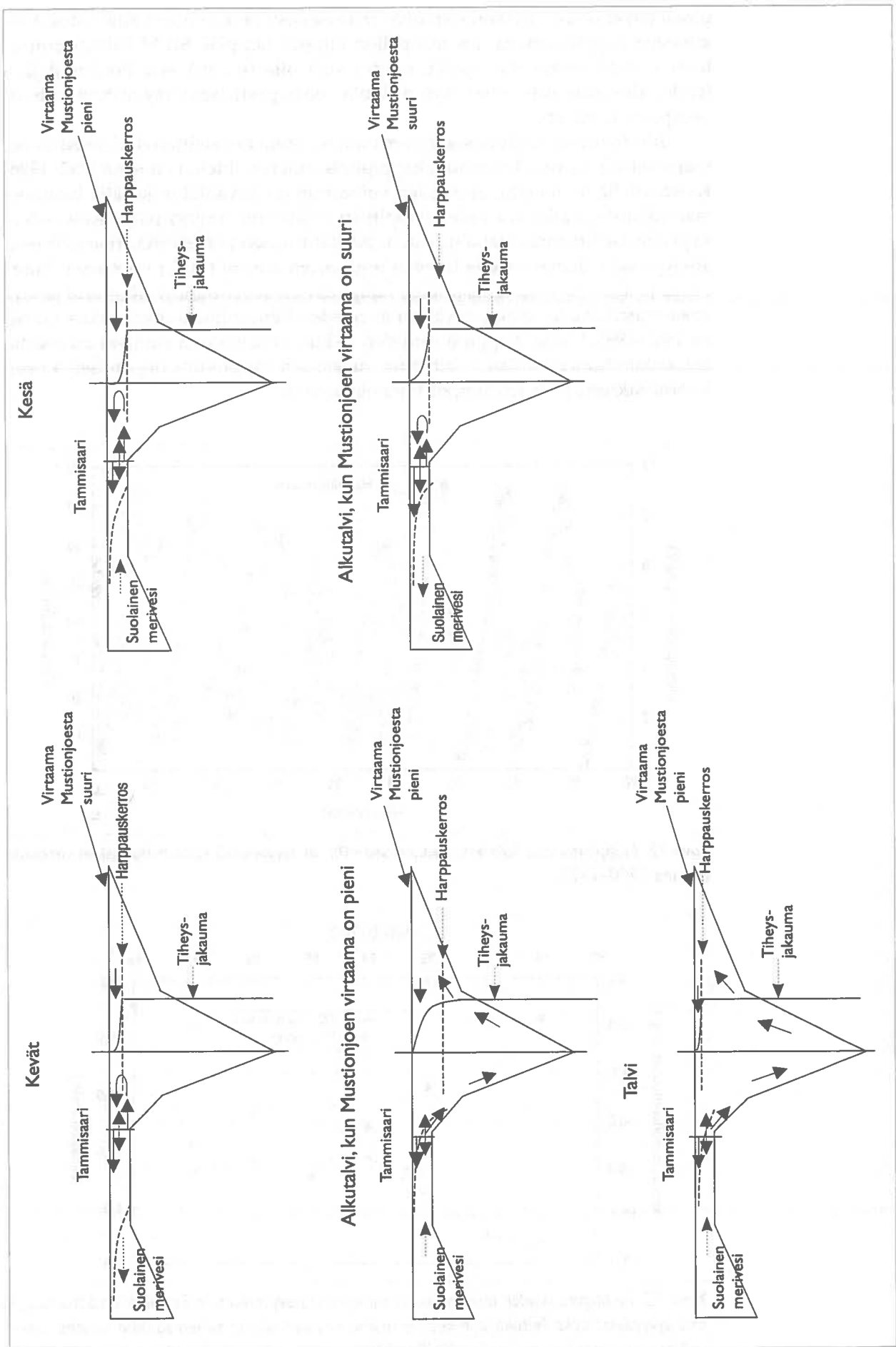
Päällysveden happipitoisuus pysyy läpi vuoden lähellä kyllästyspitoisuutta. Happipitoisuus päällysvedessä määräytyy täten suurimmalta osin veden lämpötilan perusteella. Kesäaikana on havaittavissa selvää ylikyllästymistä perustuotannon nopeutuessa, jääpeitteisenä aikana lievää alikyllästyneisyyttä.

Hapetuspumppuilla ei ole sanottavaa vaikutusta päällysveden suola- ja happipitoisuuksiin. Vuonna 1996 pumppujen läheisyydessä tehdyissä CTD-luotauksissa ja vesinäytteiden analyyseissä ei havaittu merkittävää suolaisuuden, lämpötilan ja tiheyden alueellista vaihtelua hapetuspumppujen välittömässä läheisyydessä.

Pohjanpitäjänlahden alusveden suolapitoisuus määräytyy sisäänvirtaavan suolaisen meriveden ja pystysuuntaisen sekoittumisen yhteisvaikutuksesta. Myös pumpattu vähäsuolainen päällysvesi sekoittuu alusvedeen laimentaen sen suolapitoisuutta. Syksyllä ja alkutalvella, kun valuma-aluevirtaama on pieni, Tammisaaren salmista sisään virtaava, alusvettä raskaampi merivesi syrjäyttää vanhan alusveden, ja pinta- ja alusveden tiheysero pienenee. Tällöin alusveden suolavarasto vaihtuu tehokkaimmin. Vuosien 1995 ja 1996 loppusyksyllä meriveden sisäänvirtaus alkoi jo lokakuussa valuma-aluevirtaamaan vähäisyyden ansiosta.

Alusveden happipitoisuuden vaihtelun riippuvuus vesitaseen komponenttien keskinäisistä suuruussuhteista on jossain määrin samanlainen kuin suolaisuuden vaihtelun riippuvuus. Ennen kaikkea syvänteen happipitoisuuden lasku kevätmaksimista syysminimiin näyttää riippuvan valuma-alueelta tulevan virtaaman (Peltokosken keskivirtaama elokuun alusta happiminimin saavuttamiseen asti) suuruudesta (kuvat 72–74). Mitä suurempi juoksutus Peltokoskella, sitä suurempi on happipitoisuuden lasku kevätmaksimista syysminimiin Sällvikin syvänteessä ( $R^2=0,68$ ). Ilmeisesti valuma-alueelta tuleva makea vesi laimentaa meriveden suolaisuutta salmialueella ja sen ympäristössä, niin paljon, ettei sisään virtaava merivesi pääse tunkeutumaan alusvedeen. Valuma-aluevirtaama hidastaa lisäksi meriveden sisäänvirtausta (ks luku 4.1). Myös alkutalven (1.9.–31.12.) happipitoisuuden maksimi Sällvikin syvänteessä (40 m) näyttää suoraan riippuvan valuma-alueelta tulevan virtaaman suuruudesta (Peltokosken keskivirtaama elokuun alusta happimaksimin saavuttamiseen asti; kuvat 75 ja 76). Mitä suurempi juoksutus Peltokoskella elokuun alusta lähtien, sitä alhaisempi on alkutalven happipitoisuuden maksimi Sällvikin syvänteessä ( $R^2=0,59$ ).

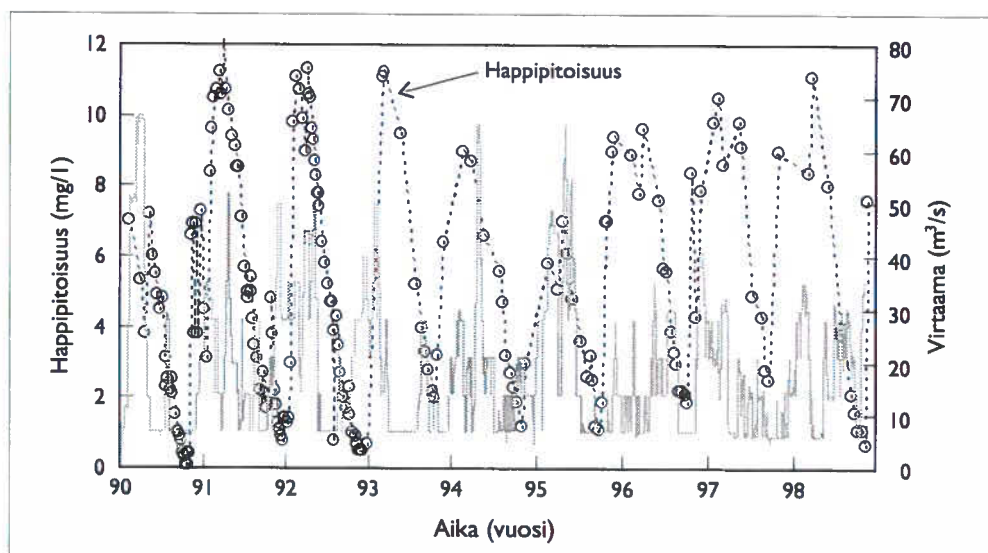
Koska korkea valuma-aluevirtaama syksyllä ( $>15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) selvästi heikentää alusveden alkutalven happitilaa, sateisen syksyn jälkeen on erityinen vaara hapen loppuunkulumiseen Pohjanpitäjänlahden alusvedessä. Mitä pidempään Peltokosken juoksutukset Mustionjoessa jatkuvat suurina, sitä suositeltavampaa hapetuspumppaus syvänteessä on. Ilmeisesti 1990-luvulla poikkeuksellisen läm-



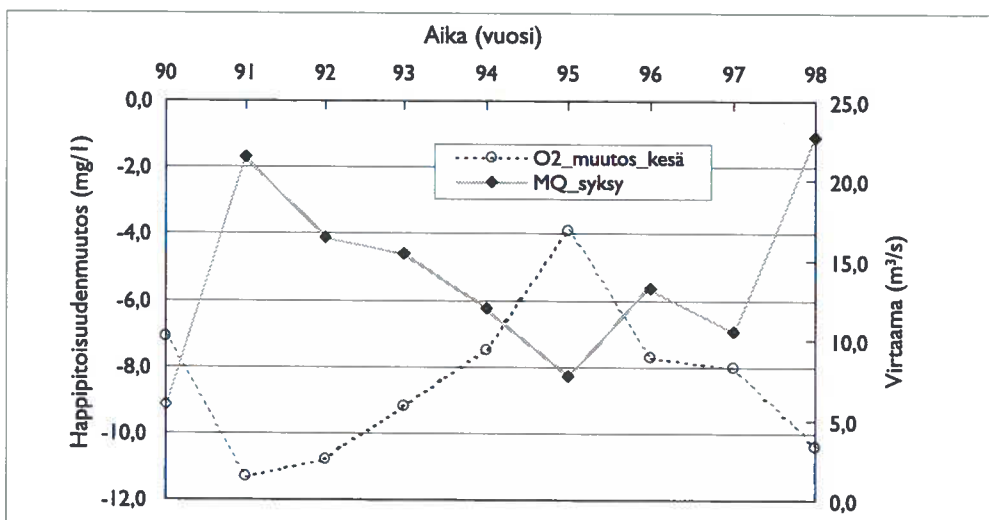
Kuva 71. Pohjanpitäjänlahden kerrostumisen ja vedenvaihdon vuodenaikavaihtelu.

pimät talvet isoine virtaamiseen ovat ratkaisevasti heikentäneet alusvedessä alkutalven happitilannetta. Jos maapallon ilmasto lämpiää SILMU-ilmastomuutosennusteen mukaisella tavalla, saattaa siitä olla seurauksena Pohjanpitäjänlahden alusveden myöhäissyksyn ja alkutalven happitilassa pysyvä muutos huonompaan suuntaan.

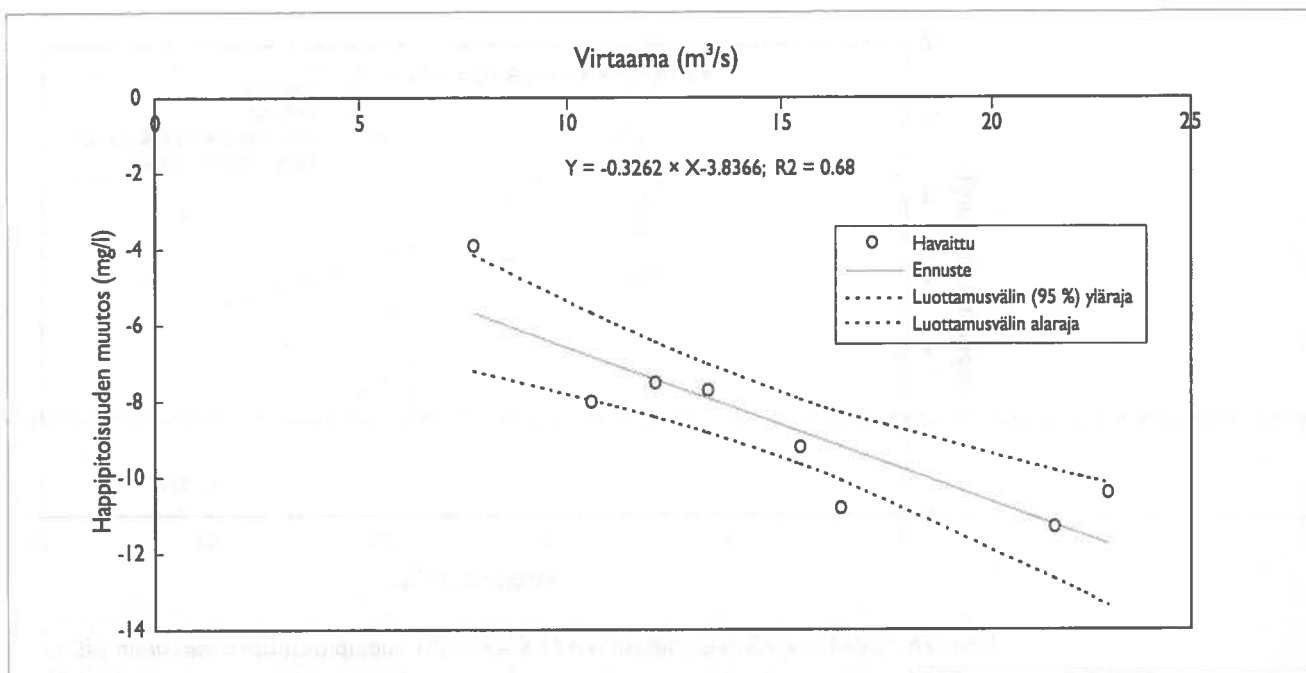
Tilastollisissa analyysissä valuma-aluevirtaama ei selittänyt alusveden kesäajan (maaliskuusta elokuuhun) happipitoisuuden vaihtelua vuosina 1982–1996. Kuten edellä on todettu, alusveden vaihdunta on keväällä ja kesällä luonnostaan vähäistä, ja siksi alusveden happitilan kehitys määräytyy pääasiassa vedessä ja pohjasedimentissä tapahtuvan hapenkulutuksen perusteella. Tilastollisissa analyysissä valuma-alueelta tulevan orgaanisen aineen (TOC) vuotuinen kuormitus ja alusveden keskimääräinen lämpötila eivät selittäneet ( $R^2 = 0,10$  ja  $0,11$  vastaavasti) maaliskuu–elokuun välistä alusveden happipitoisuuden laskua vuosina 1982–1996. Lisäksi happipitoisuuden laskun vuosittainen vaihtelu oli pientä. Hapenkulutuksen vähäisen vaihtelun vuoksi sen riippuvuus orgaanisen aineen kuormituksesta ja veden lämpötilasta oli heikko.



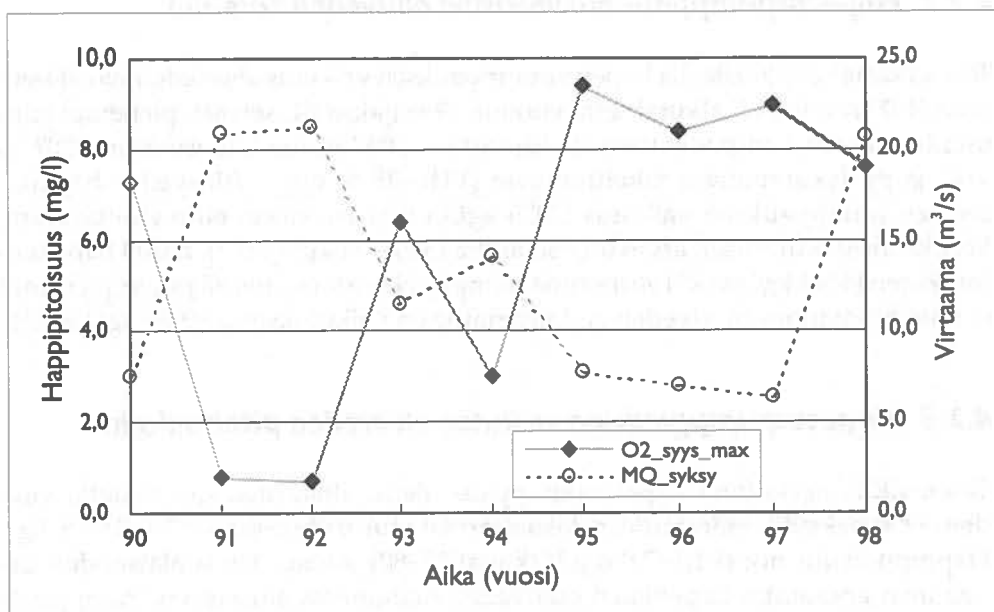
Kuva 72. Happipitoisuus Sällvikin syvänteessä 40:n m syvyydessä sekä Peltokosken virtaama vuosina 1990–1998.



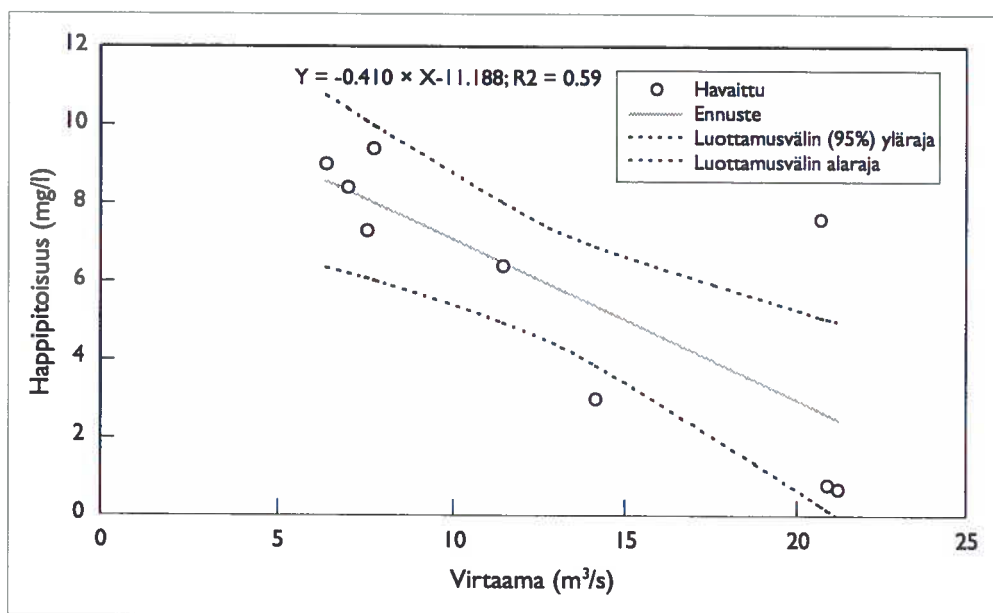
Kuva 73. Happipitoisuuden muutos kevät maksimista syysminimiin Sällvikin syvänteessä, 40 m:n syvyydessä sekä Peltokosken keskivirtaama elokuun alusta siihen saakka kunnes minimipitoisuus saavutetaan vuosina 1990–1998.



Kuva 74. Sällvikin syvänteen happipitoisuuden muutoksen (muutos kevät maksimista syysminimiin 40 m:n syvyydessä) ja Peltokosken keskivirtaaman (elokuun alusta siihen saakka kunnes minimipitoisuus saavutetaan) korrelaatio vuosina 1990–1998.



Kuva 75. Alkutalven (1.9.–31.12.) maksimihappipitoisuus Sällvikin syvänteessä, 40 m:n syvyydessä sekä Peltokosken keskivirtaama syyskuun alusta siihen saakka kunnes maksimipitoisuus saavutetaan vuosina 1990–1998.



Kuva 76. Sällvikin syvänteen alkutalven (1.9.–31.12.) happipitoisuuden maksimin (40 m syv.) ja Peltokosken keskivirtaaman (syyskuun alusta siihen saakka kunnes maksimipitoisuus saavutetaan) korrelaatio vuosina 1990–1998.

#### 4.2.2 Hapetuspumppauksen vaikutus alusveden taseisiin

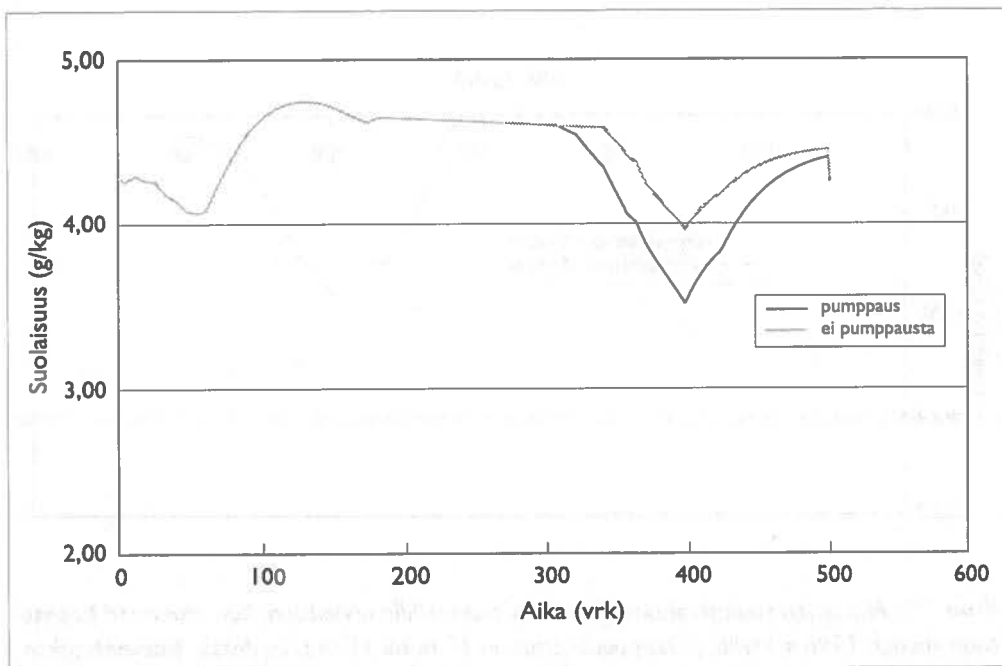
Tasetarkastelun perusteella hapetuspumppauksen vaikutus alusveden suolataseseen ( $497 \text{ tn vrk}^{-1}$ ) oli alkutalvesta vuonna 1996 (jakso III) selvästi pienempi kuin muiden taseen komponenttien (sisäänvirtaus  $2957 \text{ tn vrk}^{-1}$ , ulosvirtaus  $3207 \text{ tn vrk}^{-1}$  ja pystysuuntainen sekoittuminen  $1316\text{--}28 \text{ tn vrk}^{-1}$ ). Alusveden happitaseeseen pumppauksen vaikutus ( $2075 \text{ kgO}_2\text{vrk}^{-1}$ ) sen sijaan oli merkittävämpi. Vertikaalisekoittumisen arvio oli epätarkka ( $3405\text{--}74 \text{ kgO}_2\text{vrk}^{-1}$ ), mutta hapenkulutukseen ( $4442 \text{ kgO}_2\text{vrk}^{-1}$ ) verrattuna pumppauksen vaikutus oli puolet pienempi ja noin kolmannes meriveden sisäänvirtauksen vaikutuksesta ( $6969 \text{ kgO}_2\text{vrk}^{-1}$ ).

#### 4.2.3 Hapetuspumppauksen vaikutus alusveden pitoisuuksiin

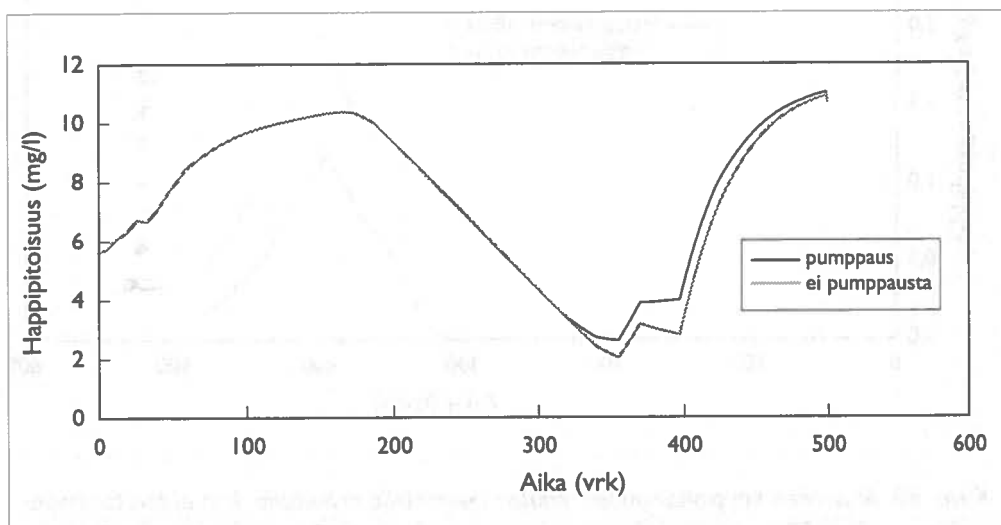
Tasemallilla arvioituna hapetuspumppaus alensi alusveden suolaisuutta vuoden 1996 syksyllä enimmillään loka-marraskuun vaihteessa  $-0,5\text{--}(-0,9) \text{ g kg}^{-1}$ . Happipitoisuus nousi  $1,1\text{--}2,0 \text{ mg l}^{-1}$  (kuvat 77–80). Alusveden suolaisuuden aleneminen edesauttoi hapekkaan meriveden painumista alusveteen. Pumppauksella oli alhaisessa happipitoisuudessa selvä alusveden happitilannetta parantava vaikutus.

Päällysveden pumppauksen 3D-mallilla lasketut vaikutukset eri vesikerrosten happipitoisuuksiin pumppujen läheisessä tulostuspisteessä P10, puolisen kilometriä pumppauspaikoilta etelään (kuva 65), olivat syksyllä 1995 kohtalaisen vähäisiä, kun taas vuonna 1996 alusveden happipitoisuus lähti nousuun melko pian pumppujen käynnistyttyä, pari viikkoa ennen kuin ilman pumppausta laskennan mukaan olisi tapahtunut.

Alueellisesti pumppauksen vaikutus näkyi ennen kaikkea alimmassa vesikerroksessa ja vahvimpana pumppujen lähellä. Vaimeampana vaikutus ulottuu myös laajemmalle. Suolapitoisuuksiin pumppauksen vaikutus oli vähäinen. Kesen alimpiin happipitoisuuksiin pumppaus ei juuri ehdi vaikuttaa.



Kuva 77. Tasemallilla laskettu suolaisuus alusvedessä, kun alusvettä hapetetaan vuoden 1996 syksyllä ja jos ei olisi hapetettu. Harppauskerros on 10 m syvyydessä. (laskentajakso 25.10.1995–1.3.1997)

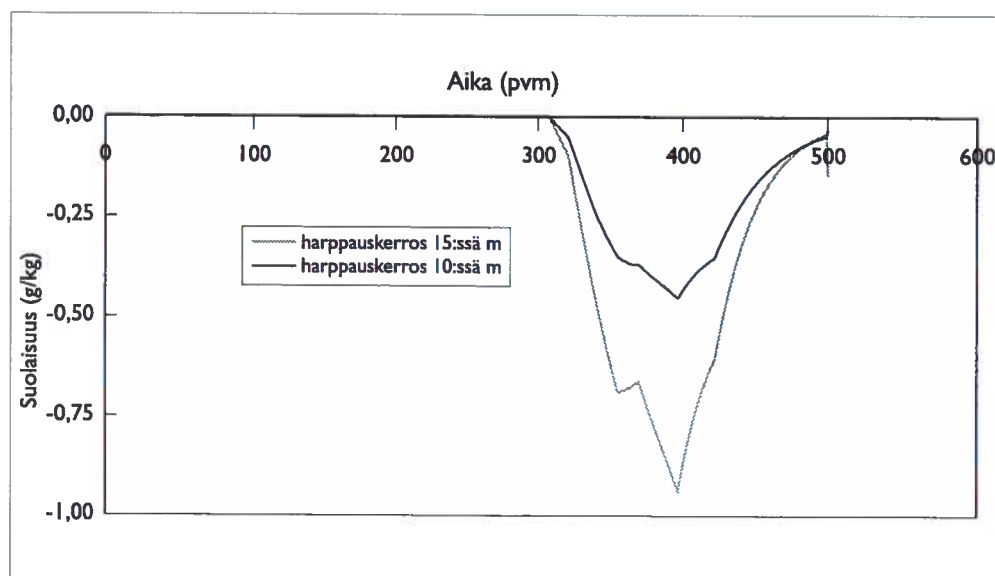


Kuva 78. Tasemallilla laskettu happipitoisuus alusvedessä, kun alusvettä hapetetaan vuoden 1996 syksyllä ja jos ei olisi hapetettu. Harppauskerros on 10 m syvyydessä. (laskentajakso 25.10.1995–1.3.1997)

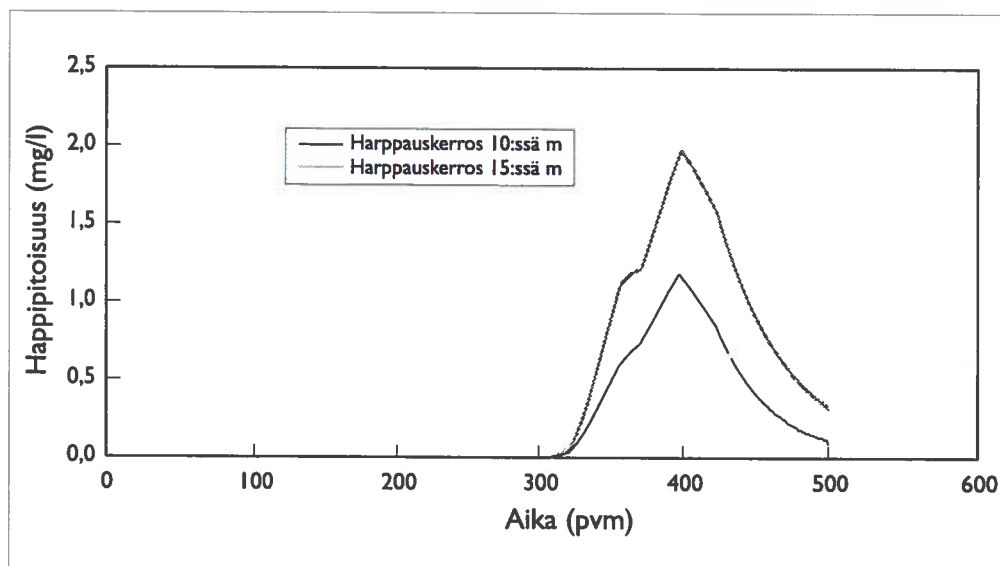
Harppauskerroksen sijainnin vaikutus siihen, kuinka paljon hapetuspumppaus muuttaa alusveden suola- ja happipitoisuutta, on tasemallilla arvioituna huomattava (kuvat 79 ja 80).

Vuonna 1996 ei havaittu CTD-mittauksissa merkittävää suolaisuuden, lämpötilan ja tiheyden vaakasuuntaista vaihtelua ts. alusveden kumpuamista pumpujen välittömässä läheisyydessä.





Kuva 79. Alusveden suolapitoisuuden muutos tasemallilla arvioituna, kun alusvettä hapetetaan vuoden 1996 syksyllä, ja harppauskerros on 10 m tai 15 m syvyydessä. (laskentajakso 25.10.1995–1.3.1997)



Kuva 80. Alusveden happipitoisuuden muutos tasemallilla arvioituna, kun alusvettä hapetetaan vuoden 1996 syksyllä, ja harppauskerros on 10 m tai 15 m syvyydessä. (laskentajakso 25.10.1995–1.3.1997)

#### 4.2.4 Kuormituksen vaikutus happipitoisuuteen

3D laskennassa ei varsinaisesti tarkasteltu TOC:n, POC:n, COD:n tai muidenkaan mitattujen happea kuluttavien muuttujien pitoisuuksia, vaan käytettiin suoraan BOD<sub>7</sub>:ää. BOD<sub>7</sub>:n pitoisuudet olivat valtaosin mittauksista pienempiä. Käytetyt syöttötiedot jäivät sen vuoksi suurelta osin mittauksilla varmistamatta. Eri tekijöistä happipitoisuuksiin aiheutuvia vaikutusosuuksia saatiin sitä vastoin hyvinkin yksityiskohtaisesti lasketuiksi.

Vaikutusosuudet koskevat vuosien 1995–1996 oloja. Vuoden 1992 oloihin 3D laskentaa ei sovellettu. Nämä tulokset mittauspisteistä s2, s5, s4, p10, s6, s7, s9 ja

s10 on koottu kuvaan 81. Kuvassa on keskitytty kunkin kohdan alimmassa vesikerroksessa lähinnä pohjaa ilmeneviin vaikutuksiin, koska happipitoisuuden vaihtelut niissä olivat laajimmat ja vaikutusten erottuminen siten selkeintä.

Laskennassa on lähdetty liikkeelle tarkastelualueelle tammikuuksi 1995 syötetyistä happipitoisuuden alkuarvoista, jotka olivat kerroksittain seuraavat: 0–3 m  $14 \text{ mg l}^{-1}$ , 3–10 m  $13 \text{ mg l}^{-1}$ , 10–15 m  $11 \text{ mg l}^{-1}$  ja 15 m alapuolella  $6 \text{ mg l}^{-1}$ . Niiden kehittymistä on ensin laskettu ilman mitään kuormituksia tai kulutusvaikutuksia luontaisesti valuma-alueen virtaamien, vedenkorkeusvaihteluiden ja tuulten mukaan vaihtelevilla virtauksilla ja luontaisesti sekoittuvina. Veden lämpötilana on pidetty koko kahden vuoden ajan talven jakaumien mukaisesti 0–3 °C, valumavesien happipitoisuutena  $14 \text{ mg l}^{-1}$  ja eteläreunan ulkopuolisen avomeren happipitoisuutena  $12 \text{ mg l}^{-1}$ .

Alkutilan happivajaus väistyy kaikissa pisteissä tulovesien korkeampien happipitoisuuksien vaikutuksesta. Alkutila syrjäytyy pisteestä s2 jyrkästi noin neljässä kuukaudessa. Varsinaisissa syvänteissä (s5, s4, s10 ja s6) syrjäytyminen etenee tasaisemmin ja vaatii loppuun päästäkseen 8–9 kuukautta. Matalilla väli-alueilla (s7 ja s9) ja eteläreunalla (s10) alkutila ei oleellisesti poikkea tulovesien määräämästä lopputilasta.

Joki- ja merivesien toisistaan eroavat happipitoisuudet ja vaihtelevat sekoitussuhteet pitävät yllä alueesta riippuen lievää vaihtelua alkutilan vaikutusten väistyttyäkin. Selvintä vaihtelu on pisteessä s9, jossa jokivesien vaikutukset korostuvat avoveden aikaan enemmän kuin jään alla. Tuulten tehostama pystysekoitus voi vaikuttaa tähän enemmän kuin mahdolliset erot virtaamasuhteissa.

Seuraavaksi vaikutukseksi on laskentaan lisätty veden lämpötilan luontainen kehitys. Kun kuormituksia tai kulutusta ei ole, vaikuttaa lämpötila happipitoisuuksiin vain hapen kyllästyspitoisuutta alentamalla. Tämä vaikutus käy kuvasta 81 ilmi kahden ylimmän viivan erotuksena. Pohjanpitäjänlahdella (s2–s6) se alentaa kesän happipitoisuuksia noin neljänneksellä. Sen vaikutus näkyy läpi talven, vaikka veden lämpötila on silloin sama kuin edeltäneessä laskelmassa. Tammisaaren siltojen takana matalalla (s7) veden lämpötila vastaa lähes kaikesta hapen vajauksesta, Kaupunginselällä Tammisaaren edustalla (s9) valtaosasta (60–70 %:sta).

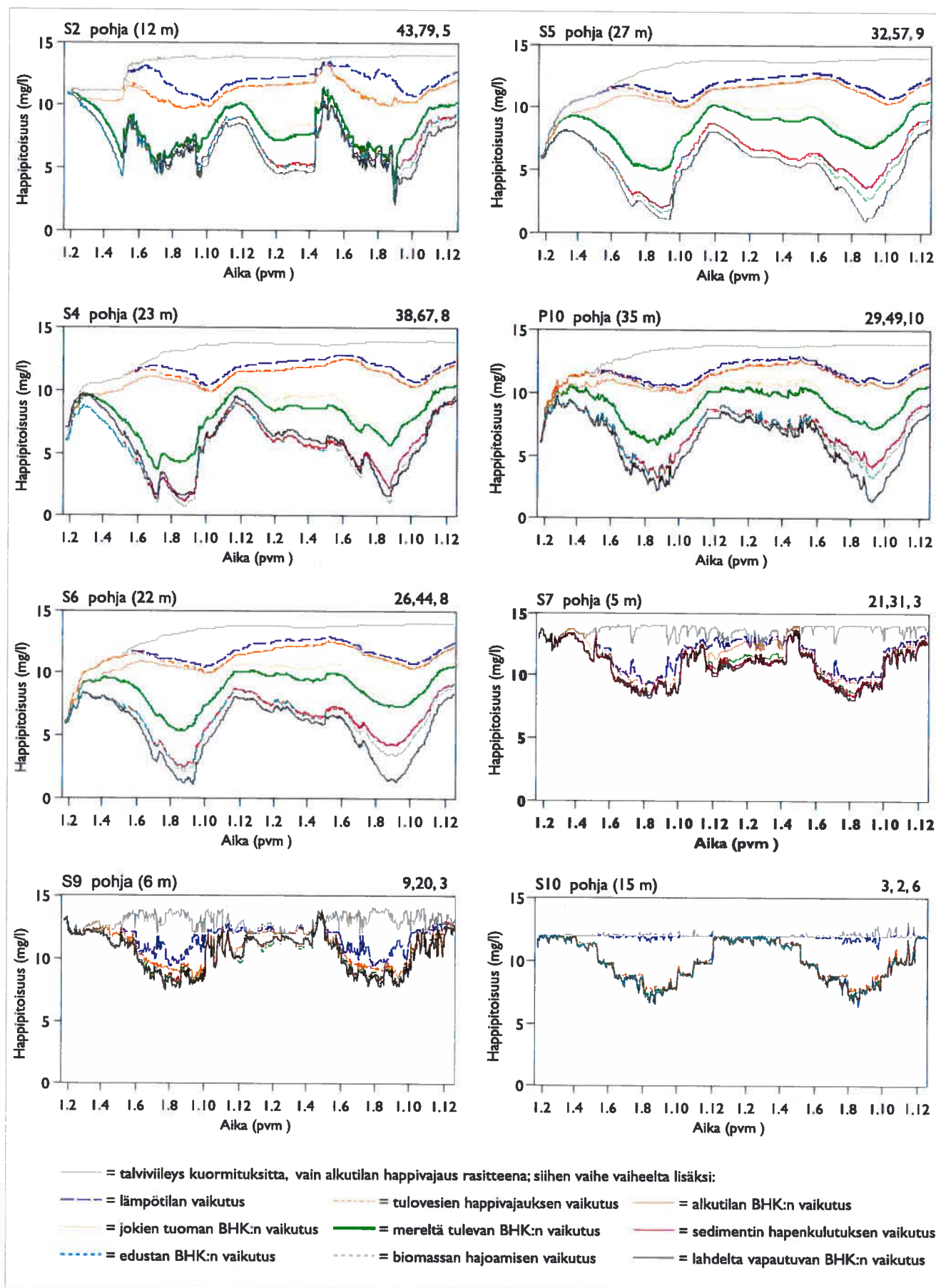
Aivan eteläreunalla (s10) kyllästyspitoisuuden muutos ei paljon ehdi vaikuttaa, vaan vasta tulovesien happivajauksen korjaaminen veden lämpötilaa vastaavaksi johtaa siellä jyrkkään muutokseen. Se vastaakin eteläreunalla käytännössä kaikesta hapen vajauksesta. Tulovesien happivajauksen vaikutus näkyy kuvassa 81 toiseksi ja kolmanneksi ylimpien viivojen välisenä erotuksena. Eteläreunaa lukuunottamatta sen merkitys on muissa tarkastelupisteissä vähäinen.

BOD<sub>7</sub>:n alkuarvojen (syvyydellä 0–12 m  $0,2 \text{ mg l}^{-1}$  ja 12 metrin alapuolella  $1 \text{ mg l}^{-1}$ ) merkitys näkyy kuvassa 81 seuraavan kahden viivan erotuksena. Vaikutus on kaikkialla vähäinen. Keväällä ja alkukesästä 1995 se vastaa silti syvänteissä hapen kulumisesta enimmillään  $1 \text{ mg l}^{-1}$ .

Valumavesien mukaan syötetyn BOD<sub>7</sub>:n vaikutus alkutilan jälkeen lisättyinä näkyy erittäin selvästi Pohjanpitäjänlahdella. Kuvaan 81 se on piirretty neljänneksi ja viidenneksi ylimpien viivojen erotuksena. Pohjoisosissa (s2, s5 ja s4) valumavesien BOD:n merkitys on kesäisin jopa puolet kaikesta hapenkulumisesta, s4:ssä enimmillään  $7 \text{ mg l}^{-1}$ . Pohjoisosissa talvella sekä pääsyvänteessä (p10) ja sen eteläpuolella (s6) kautta vuoden valumavesien BOD:n vaikutus merkitsee noin kolmannesta kaikesta hapen vähennyksestä.

Vastaavasti mereltä tulevan BOD:n vaikutusta esitetään kuvassa 81 taas kahden seuraavan viivan erotuksena. Vaikutus näkyy selvimmin Pohjanpitäjänlahdella talvisin, ja on silloin enimmillään lähes  $1 \text{ mg l}^{-1}$  sekun.

Tämän jälkeen on lisätty pohjasedimentin hapenkulutus. Tämä on kolmas merkittävä Pohjanpitäjänlahdelta happea alentava vaikutus. Pohjoisimpana (s2)



Kuva 81. Osa osalta lisättyjen vähennys-, kuormitus- ja kulutustekijöiden vaikutus havainto- ja tulostuspisteiden s2, s5, s4, p10, s6, s7, s9 ja s10 pohjakerrosten happipitoisuuksiin 1995–1996.

sen merkitys keskittyy talviin, syvimmillä alueilla (s5, s4, p10, s6) se on kautta vuoden likimain kolmasosa kaikesta hapen alenemasta, usein noin 3 mg l<sup>-1</sup>.

Tammisaaren edustan matalien alueiden pohjilta vapautumaan syötetyn BOD<sub>7</sub>:n merkitys jää käytännössä kaikkialla täysin näkymättömiin. Sitä vastoin levien hajoamisen hapenkulutusvaikutus – toiseksi ja kolmanneksi alimpien viivojen erotus kuvassa 81 – nousee loppukesästä 1996 selvästi esiin syvimmillä alueilla (s5, s4, p10, s6) ja on silloin lähes 1 mg l<sup>-1</sup>.

Pohjanpitäjänlahden pohjilta vapautumaan syötetyn BOD<sub>7</sub>:n merkitys korostuu sekin loppukesästä 1996. Alimpien kahden viivan erotus on laajimmillaan pisteessä s6 jopa 2 mg l<sup>-1</sup>. Huomattava merkitys sillä on myös pisteissä s5 ja p10, mutta piste s4 jää sen vaikutuksista paljolti sivuun. Pohjilta vapautumaan syötetyn BOD<sub>7</sub>:n jälkeen on kaikki laskennan kuormitus-, kulutus- ja vähene-misvaikutukset otettu huomioon. Samalla tuloksissa on päästy kuvissa 63 ja 64 vallinneen tilan laskentatuloksiin.

Kaiken kaikkiaan kuvassa 81 Pohjanpitäjänlahden osalta korostuu lämpötilasta riippuvan kyllästyspitoisuuden, valumavesien BOD<sub>7</sub>:n ja pohjasedimentin hapenkulutuksen vaikutus. Niistä kukin vastaa yksinään yhtä suuresta hapen vähennyksestä kuin kaikki muut vaikutukset yhteensä. Pohjanpitäjänlahden matalalla eteläosalla (s7) kyllästyspitoisuuden alenema määrää happipitoisuuden lähes täysin ja Stadsfjärdenin selällä (s9) 2/3-osalta. Eteläreunan (s10) happipitoisuudet ovat taas täysin mereltä tulevien vesien happivajauksen määräämiä.

Pelkkiiin vaikutuspäätelmiin perustuneet kuormitusvaikutukset, kuten pohjilta vapautumaan syötetyt, eivät kovin ratkaisevasti määrää laskentatulosta, vaan sitä hallitsevat selkeät fysikaaliset ja miltei mittauksillakin varmennettavissa olevat vaikutukset. Näistä kyllästyspitoisuuden lämpötilariippuvuus lienee selkein ja kiistattomin. Pohjan hapenkulutuksesta on jo jonkin verran mittaustuloksia, eikä laskentaan syötettyjä vaikutuksia niihin verrattuina ole yliarvioitu.

Jokivesien BOD<sub>7</sub>-pitoisuus jää useimmiten mittausten ulottumattomiin. Kuormitus arvioitiin BOD<sub>7</sub>:n pitoisuushavaintojen ja muiden vedenlaatutietojen perusteella.

## 4.3 Alusvedessä happea kuluttavan orgaanisen aineksen tase

### 4.3.1 Valuma-alueelta tulevan ja perustuotannosta peräisin olevan hiukkasmaisen orgaanisen aineen kuormitus

Valuma-alueelta tulevan orgaanisen aineen kuorman laskeutuminen alusveteen eli reduktio (R) riippuu orgaanisen aineen laskeutumisnopeuden (S) ja päällysveden pintakuorman (S<sub>0</sub>) välisestä suhteesta (Kajosaari 1981).

$$R = S / S_0 \times 100 \%, \text{ kun } S < S_0 \quad (7a)$$

$$R = 100 \%, \text{ kun } S > S_0 \quad (7b)$$

Pintakuormateorian mukaan hitaimmin laskeutuvan, altaaseen juuri ja juuri laskeutuvan hiukkasen laskeutumisnopeus (= pintakuorma S<sub>0</sub>) on sama kuin altaan virtaaman (Q) ja pinta-alan (A) osamäärä.

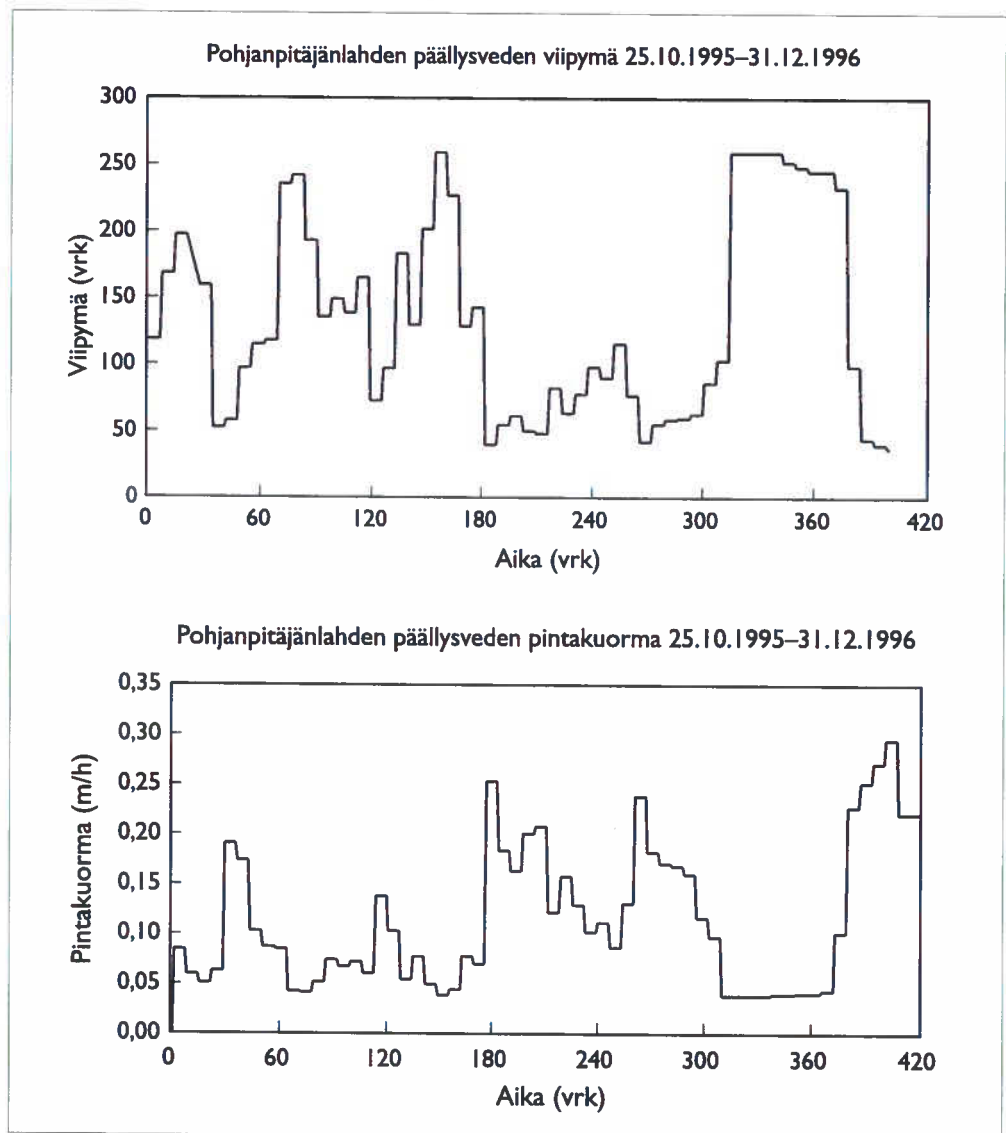
$$S_0 = Q / A \quad (8)$$

Tämän osamäärän dimensio on pituus jaettuna aikayksiköllä, ja sen voi ajatella tarkoittavan sen vesikerroksen paksuutta, joka virtaamasta muodostuisi al-

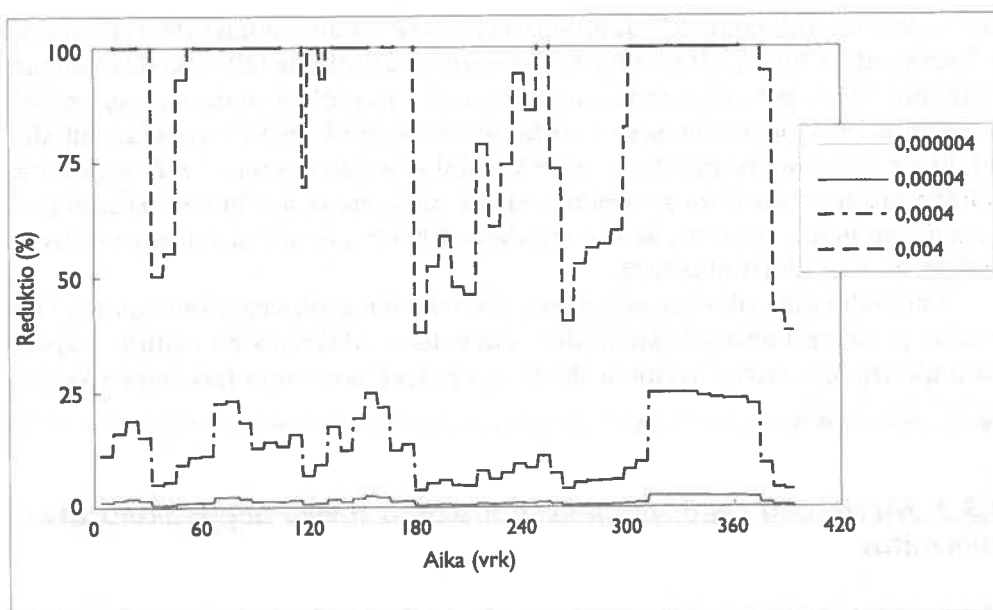
taan pinnalle yhdessä aikayksikössä. Pintakuormateorian lähtökohtana olevat otaksumat pitävät paikkansa vain likimäärin – erityisesti virtausolosuhteiden poiketessa paljon oletetuista.

Pohjanpitäjänlahden päällysveden (0–10 m) keskimääräinen pinta-ala (tilavuuden ja syvyyden osamäärä) on  $1,5669 \times 10^7 \text{ m}^2$  ja tilavuus on  $1,5669 \times 10^8 \text{ m}^3$ . Viipymä on 37–260 päivää ja pintakuorma 0,048–0,24 m vrk<sup>-1</sup> vuodenajasta ja virtaamasta riippuen (kuva 82).

Laskeutuvan aineen teoreettinen poistuma (reduktio) päällysvedestä ja laskeutuminen alusveteen vaihtelee 0–100 % virtaamasta ja hiukkasten laskeutumisnopeudesta riippuen (kuva 83). Saven ( $S=4 \times 10^{-5} \text{ m vrk}^{-1}$ ) keskimääräinen reduktio pintavedestä on 0,1 %. Hiedalle ( $S=7,2 \text{ m vrk}^{-1}$ ) reduktio on 100 %. Todellisuudessa turbulenttisessa virtauksessa reduktio on hieman pienempää. Jos orgaanisen aineen laskeutumisnopeus on samaa suuruusluokkaa kuin saven, ei sitä pääse paljoakaan alusveteen laskeutumaan. Mutta, jos orgaanisen aineen laskeutumisnopeus on esimerkiksi kaksi kertaluokkaa suurempi ( $4 \times 10^{-4} \text{ m vrk}^{-1}$ ) kuin savella, on reduktio jo merkittävää (13 %).



Kuva 82. Pohjanpitäjänlahden päällysveden viipymä ja pintakuorma 25.10.1995–31.12.1996



Kuva 83. Pohjanpitäjänlahden päällysveden reduktio 25.10.1995–31.12.1996, kun laskeutuvan hiukkasen laskeutumisnopeus on  $4 \times 10^{-6}$  m vrk<sup>-1</sup>,  $4 \times 10^{-5}$  m vrk<sup>-1</sup>,  $4 \times 10^{-4}$  m vrk<sup>-1</sup> ja  $4 \times 10^{-3}$  m vrk<sup>-1</sup>.

Vuonna 1992 alusveteen sedimentoitui hiiltä jaksolla 26.3.–25.11. yhteensä 112 g m<sup>-2</sup> eli keskimäärin noin 460 mg m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup> (Tallberg ja Heiskanen 1998). Tästä keskimäärin kahdeksan prosenttia eli 37 mg m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup> (Tallberg ja Heiskanen 1998, Heiskanen ja Tallberg 1999) arvioitiin olevan peräisin ulappa-alueen perustuotannosta. Vuonna 1992 määritettyjen Mustionjoen POC-pitoisuuksien (kuukausikeskiarvot) ja virtaamatietojen perusteella POC-kuorma oli tällä jaksolla noin 1080 kg vrk<sup>-1</sup>. Hiukkashiilen keskimääräisen laskeutumisnopeuden arvioitiin vuoden 1992 tutkimuksessa olevan Pohjanpitäjänlahdella 0,94 m vrk<sup>-1</sup>. Arvioitun laskeutumisnopeuden perusteella hiukkasmaisen hiili ehtii laskeutumaan kokonaisuudessaan Pohjanpitäjänlahdella. Tämän perusteella saadaan alusveteen laskeutuneen POC:n määräksi 47 mg m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup>, joten 82 prosenttia eli 376 mg m<sup>-2</sup> vrk<sup>-1</sup> oli vuonna 1992 peräisin jostain muualta esim. saaristo- ja rannikkoalueelta tai johtui lahtialueella resuspendoituneen hiukkasmaisen orgaanisen aineen kertymisestä syvänteeseen.

Vuonna 1992 tehtyjen tutkimusten mukaan keskimääräinen hiukkasmaisen orgaanisen hiilen (POC) pitoisuus Mustionjoen suulla oli 0,6 mg l<sup>-1</sup> eli noin 10 % TOC:n seurantatulosten keskiarvosta vuonna 1992. Vuonna 1996 POC-pitoisuuksia määritettiin vain 2.9. Metsä-Serla Oy:n selvityksessä (Metsä Serla Oy, julkaisematon tieto). Mustionjoen alaosasta 2.9. otetuissa näytteissä 15–18 % orgaanisesta hiilestä oli kiintoaineeseen sitoutunutta. Vuonna 1992 syyskuussa osuus oli hieman yli 10 %, mutta myöhemmin syksyllä noin 15 %. Osuuden todellisen vaihtelun lisäksi eroa vuosien välille on saattanut aiheutua menetelmällisistä eroista. Menetelmät erosivat mm. suotimen osalta. Hiukkasmaisen aines erotettiin vuonna 1996 kalvosuotimella (0,45 mm) eikä lasikuitusuotimella (GF/F) kuten vuoden 1992 tutkimuksissa. Jonkin verran eroa saattoi aiheuta myös siitä, että vuonna 1992 orgaanisen hiilen kokonaispitoisuutta ja hiukkasmaisen hiilen pitoisuutta ei määritetty samalla kertaa.

Mustionjoen TOC-kuormitus oli vuonna 1996 lähes sama kuin vuonna 1992 (noin 11 tn vrk<sup>-1</sup>). Vuoden 1992 tutkimusaikaa vastaavalla jaksolla vuonna 1996



TOC-kuormitus oli noin 10 % suurempi ( $11 \text{ tn vrk}^{-1}$ ) kuin vuonna 1992 ( $10 \text{ tn vrk}^{-1}$ ). Tämä viittaa siihen, että myös POC-kuorma saattoi olla tällä jaksolla hieman suurempi. Myös perustuotannosta peräisin olevan hiukkasmaisen hiilen määrä oli vuonna 1996 todennäköisesti vuotta 1992 suurempi, koska levämäärä oli klorofylli a:n pitoisuutena mitattuna noin kaksinkertainen vuoteen 1992 verrattuna. Näiden erojen vaikutusta sedimentoituvan hiukkasmaisen hiilen osuuksiin ei kuitenkaan voida arvioida, koska vuodelta 1996 ei ole tietoja sedimentoituvan hiukkasmaisen hiilen määrästä.

Litoraalin makrolevien, erityisesti rihmalevien tuottama biomassa voi kulkeutua ja vajota Pohjanpitäjänlahden alusveteen. Makrolevien osuutta hapenkulutuksesta on vaikea arvioida ilman rihmalevätuotannon tarkempaa kartoitusta lahtialueella.

#### **4.3.2 Meriveden sisäänvirtauksen mukana tuleva happeakuluttava kuormitus**

Virtausmittauksia ja hiukkasmaisen orgaanisen hiilen (POC) pitoisuushavaintoja ei tehty samanaikaisesti. Meriveden sisäänvirtauksen merkitystä Pohjanpitäjänlahden alusveden hiukkasmaisen orgaanisen hiilen lähteenä voidaan kuitenkin arvioida karkeasti käyttämällä vuosien 1995 ja 1996 virtaustietoja ja vuoden 1992 POC-tuloksia. Tammisaaressa salmien pohjanläheisessä vesikerroksessa havaittiin vuosina 1995–1996 keskimäärin  $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  virtaama sisäänpäin. Vuonna 1992 sisään virtaavan meriveden (Tammisaaren sillat, alusvesi) POC-pitoisuus oli keskimäärin  $666 \text{ mg m}^{-3}$ . Em. virtaamalla ja pitoisuudella saadaan mereltä alusveteen tulevaksi keskimääräiseksi POC-kuormaksi  $230 \text{ kg vrk}^{-1}$  eli  $10 \text{ mg m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ . Tämä selittäisi vain pienen osan alusvedessä vuonna 1992 todetusta POC-sedimentaatiosta.

Toisaalta Tammisaaren salmien koko poikkileikkauksessa edestakaisin virtaava vesi ja syksyn keskimääräistä suuremmat sisäänvirtaukset tuovat ehkä lähelle ja sen alusveteen huomattavasti enemmän orgaanista hiukkasmaista ainetta kuin edellä on arvioitu. Tuulen ja vedenkorkeusvaihteluiden Tammisaaren salmiin aiheuttama vaihdunta voi tuoda päällysveteen merkittävästi hiukkasmaista hiililtä, joka laskeutuu alusveteen. Keskimääräinen vaihdunta (bruttosisäänvirtaama) oli vuosina 1995–1996  $32,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , lokakuusta vuoden loppuun  $41,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Syksyllä (15.9. –25.11.) 1992 POC-pitoisuus oli keskimäärin  $860 \text{ mg m}^{-3}$ , ajoittain jopa  $1400 \text{ mg m}^{-3}$ . Tämän perusteella meriveden mukana tuleva POC-kuorma voi olla jopa  $2400\text{--}5000 \text{ kg vrk}^{-1}$ , ja sedimentaatio  $100\text{--}220 \text{ mg m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$  vastaavasti. Tämä selittäisi merkittävän osan vuonna 1992 todetusta POC-sedimentaatiosta. Karkea tarkastelu osoittaa, että saaristo- ja rannikkoalueelta voi kulkeutua alusveteen huomattavasti suurempi määrä hiukkasmaista orgaanista hiiltä kuin pelkästään tiheysvirtausten alusveteen suoraan tuoma kuormitus.

Vuonna 1992 merkittävää tiheysvirtausta alusveteen ei tapahtunut syksyllä eikä edes vuoden vaihteeseen mennessä, sillä happipitoisuus Sällvikin syvänteessä pysyi lähellä nollaa aina vuoden 1992 loppuun asti. Tiheysvirtaus ei siis tällöin aiheuttanut suoraa POC-kuormitusta alusveteen. Sällvikin hiukkasmaisen hiilen pitoisuus nousi kuitenkin loppusyksystä sekä päällysveteen että alusvedessä (kuva 23). Peltokosken virtaama oli pieni ( $7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) lokakuun puoliväliin asti, mutta siitä eteenpäin erittäin suuri ( $30\text{--}40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ). Alkusyksyn alhainen jokivirtaama mahdollisesti edesauttoi suolaisen meriveden työntymistä lahtialueelle päin. Suolaisen veden työntyminen ei ehtinyt edetä Tammisaaren pohjoispuolelle siinä määrin, että tapahtuisi alusveden uusiutumista. Tammisaaressa tapahtuva vedenvaihto toi kuitenkin mahdollisesti päällysveteen hiukkasmaista orgaanista ainetta, joka sedimentoitui alusveteen.

Todennäköisesti syksy- ja talviaikainen meriveden sisäänvirtaus tuo vuosittain merkittävän määrän hiukasmaista orgaanista ainetta Pohjanpitäjänlahdelle ja lisää huomattavasti alusveden happekuluttavan aineen määrää. Sisäänvirtaavan veden mukana alusveteen tulee myös liukoisessa muodossa olevaa hiiltä (DOC), jolla on hapenkulutusta lisäävä vaikutus. Meriveden sisäänvirtauksella on siis kahden suuntainen vaikutus Pohjanpitäjänlahden alusveden happitilaan, toisaalta se on välttämätön alusveden happivaraston uudistaja mutta toisaalta se heikentää happitilannetta lisäämällä hapenkulutusta. Harppauskerroksen alle painuvat tiheysvirtaukset tuovat alusveteen samanaikaisesti sekä happea että hapenkulutusta aiheuttavaa kuormitusta. Epäedullisin tilanne on silloin, kun tiheysvirtausta alusveteen ei tapahdu mutta mereltä kulkeutuu hiukasmaista happea kuluttavaa kuormitusta päällysveden kautta alusveteen.

#### 4.4 Hapetuspumppauksen vaikutus ravinteiden liikkumiseen

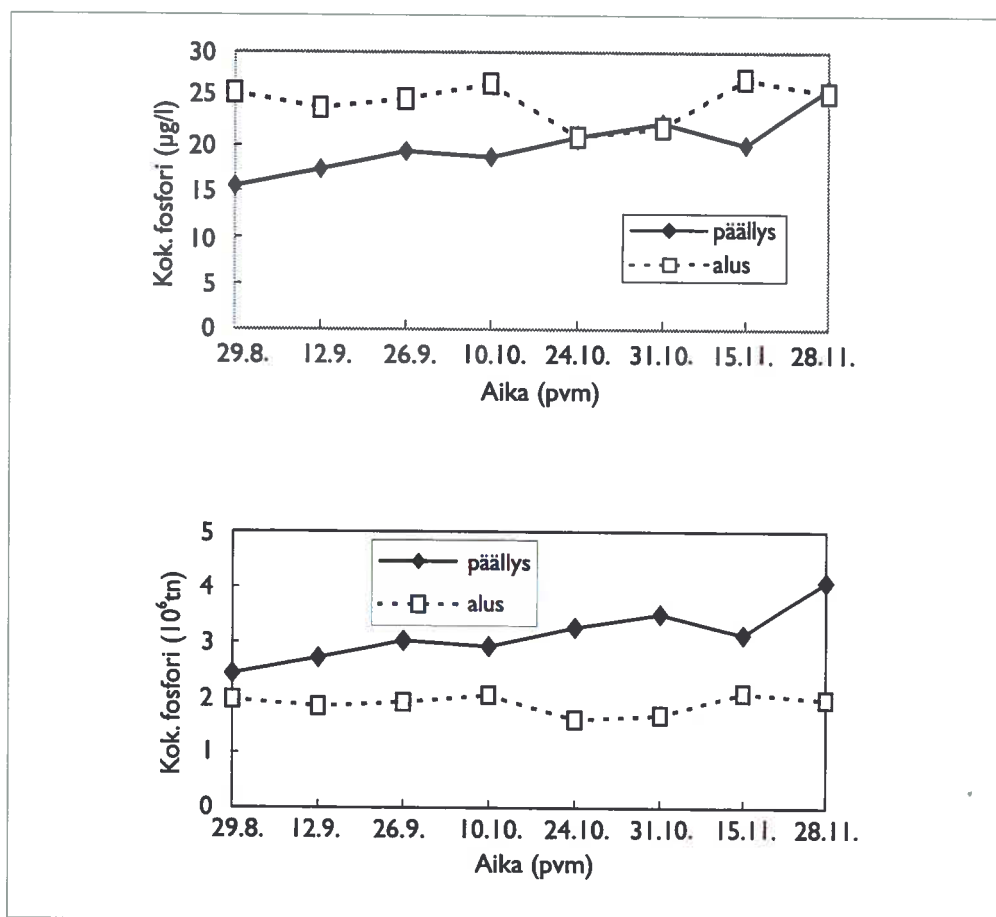
Pohjanpitäjänlahden hapetusta aloitettaessa oltiin huolestuneita siitä aiheuttaako hapetuspumppaus alusveden ravinteikkaan veden siirtymistä päällysveteen ja sitä kautta rehevöitymisen lisääntymistä lahdella. Useimmiten syvänteiden alusvedessä heikon happitilanteen vallitessa fosforipitoisuus on korkeampi kuin päällysvedessä. Koska kerrostuneisuus kuitenkin säilyi pumppauksen aikana, ravinteiden siirtymisen oletettiin olevan vähäistä pumppauksen vaikutuksesta.

Syksyllä 1995 klorofylliarvot nousivat pian hapetuksen aloittamisen jälkeen Pohjanpitäjänlahdella (kuva 24). Levämäärän kasvu syksyisin on säännöllistä, mutta syksyn 1995 nousu oli hieman edellisvuosia voimakkaampaa (kuva 24). Samanaikaisesti hapetuspumppauksissa oli ongelmia eivätkä ne siirtäneet vettä suunnitelmien mukaan (Pokki ja Holmberg 1996). Klorofylliarvojen lisäksi nousi myös päällysveden kokonaisfosforipitoisuus. Vähän myöhemmin levien vähennyttyä, vedessä oli myös melko runsaasti jäljellä fosfaattia (kuvat 25 ja 26).

Hapetuksen vaikutuksia ravinteiden liikkumiseen on seuraavassa karkeasti arvioitu tarkastelemalla vesimassan fosforipitoisuuksien ja fosforisisällön muutoksia Sällvikin syvänteellä hapetusjaksojen aikana (kuvat 84 ja 85). Laskelmat on tehty käyttäen syvänteiden kokonaisfosforipitoisuuksia ja koko lahden tilavuusosuuksia. Päällysveteen on laskettu 0–10 m:n syvyysvyöhyke.

Alusveden kokonaisfosforin keskipitoisuus oli syksyllä 1995 selvästi korkeampi kuin päällysveden. Havaintokerroilla 24.10. ja 31.10. alusveden pitoisuus kuitenkin laski ja samalla päällysveden pitoisuus nousi. Alusveden fosforisisältö väheni elokuun lopun tilanteeseen verrattuna noin 200–300 kg ja päällysveden fosforisisältö nousi koko päällysvesitilavuuteen laskettuna samana aikana noin 900–1100 kg (kuva 84).

Leväbiomassa klorofyllillä mitattuna nousi korkeaksi 24.10. ja 31.10 havaintokerroilla, eli samoilla kerroilla, jolloin alusveden fosfori oli laskenut ja päällysveden kasvanut. On siten todennäköistä, että alusvedestä on tällöin siirtynyt fosforia päällysveteen, mikä on voimistanut levien kasvua. Tämä on voinut tapahtua siten, että uusi raskaampi vesi on työntänyt pohjan fosforipitoisempaa vettä ylöspäin. Tämä raskaamman veden sijoittuminen pohjalle näkyi mm. samanaikaisessa lämpötilan ja suolaisuuden vertikaalisessa jakaantumisessa syvänteellä. Hapetuspumppauksella on voinut olla tätä siirtymää tukevaa vaikutusta. Fosforisisällön muutoksen perusteella fosforimäärän nousu päällysvedessä on suuruudeltaan huomattavasti suurempaa kuin pelkästään alusvedestä olisi päällysveteen voinut siirtyä. Tämän vuoksi päällysveteen on todennäköisesti siirtynyt fosforia myös suoraan merivesipulssien mukana. Syksyltä 1995 ei ole käytettävissä

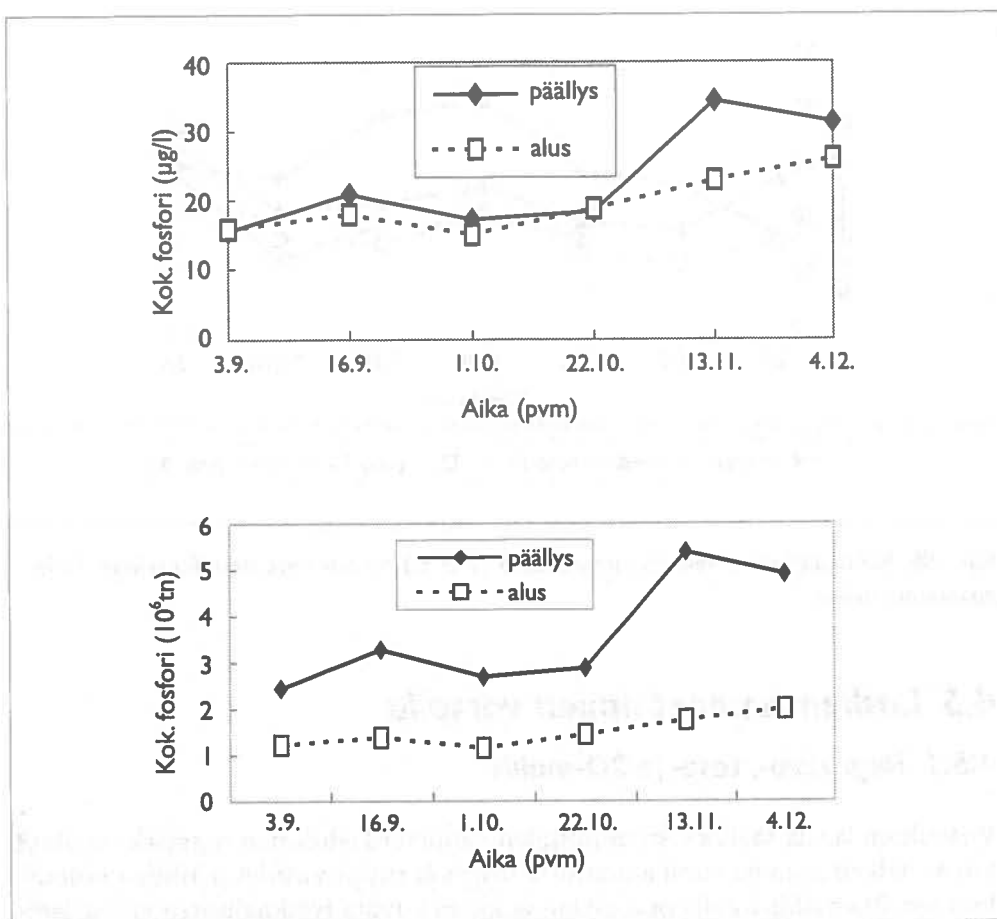


Kuva 84. Päälyys- ja alusveden kokonaisfosforin keskipitoisuus (yllä) sekä kokonaisfosforisisältö (alla) Sällvikin syvänteellä syksyn 1995 havaintokerroilla.

tuloksia ulkoa sisään tulevan veden fosforipitoisuuksista, joten asiaa ei voida varmistaa. Syksy 1995 oli vähäsateinen ja Mustionjoesta tullut fosforimäärä oli suunnilleen sama jakson elo-lokakuu 1995 aikana, joten merkittävää fosforilisää ei samaan aikaan tullut valuma-alueelta (kuva 5 b).

Syksyllä 1996 päälyysveden ja alusveden fosforipitoisuudet erosivat paljon vähemmän toisistaan kuin syksyn 1995 aikana. Päälyysvedessä kokonaisfosforin keskipitoisuus oli kuitenkin koko ajan hieman alusveden keskipitoisuutta korkeampi. Pumppauksen vaikutuksesta ei siten olisi voinutkaan siirtyä fosforipitoisempaa vettä päälyysveteen. Syyskuun puolivälistä lokakuun alkuun sekä päälyysveden että alusveden kokonaisfosforipitoisuus ja kokonaisfosforisisältö selvästi laskivat. Sen jälkeen sekä alusvedessä että erityisesti päälyysvedessä tapahtui fosforipitoisuuksien ja fosforisisällön voimakasta kasvua. Marraskuussa valumat kasvoivat voimakkaasti, minkä vuoksi fosforipitoisuudet myös Pohjanpitäjänlahdella nousivat (mm. kuvat 5 ja 25). Nousua Pohjanpitäjänlahden kokonaisfosforipitoisuuksissa tapahtui kuitenkin jo ennen Mustionjoelta tulevan kuormituksen kasvua, mikä viittaisi sisäänvirtauksen vaikutuksiin. Tämä näkyy mm. kuvista 25 ja 26. Asian tarkentamiseksi on kuvassa 86 vielä esitetty pintaveden kokonaisfosforipitoisuuden kehitys neljällä havaintoasemalla syksyn 1996 aikana.

Kokonaisfosforipitoisuus Tammisaaren ulkopuolen havaintoasemalla (p 12) on koko ajan ollut huomattavasti korkeampi kuin itse lahdella. Pitoisuus Tammisaaren ulkopuolella oli korkeampi myös alkukesästä 1996 (kuva 25). Myös lahden eteläosan (p 11) kokonaisfosforipitoisuus oli useimmilla havaintokerroil-

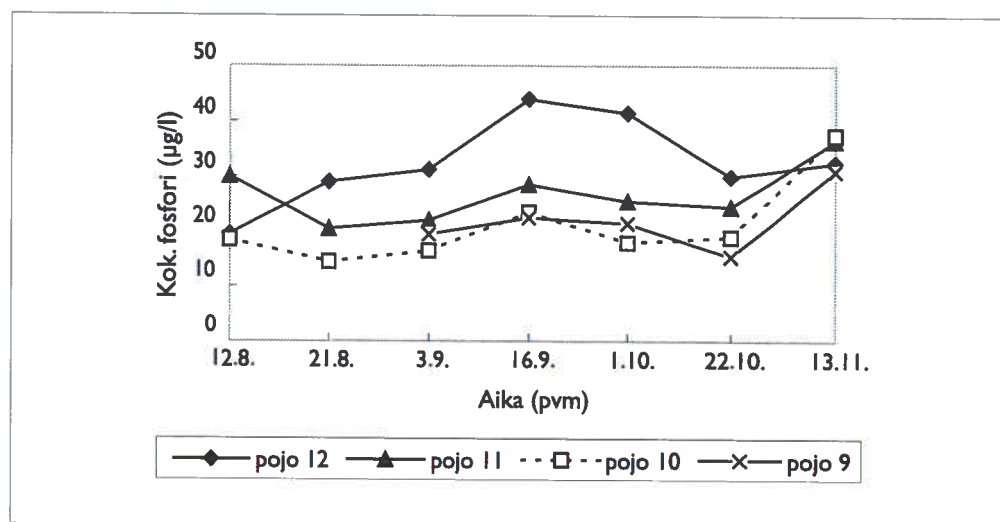


Kuva 85. Päällys- ja alusveden kokonaisfosforin keskipitoisuus (yllä) sekä fosforisisältö (alla) Sällvikin syvänteellä syksyn 1996 havaintokerroilla.

la korkeampi kuin Sällvikin syvänteellä (p 10) tai sisimmällä, lähinnä Mustionjoen suuta olevalla havaintopaikalla (p 9). On siten hyvin todennäköistä, että kokonaisfosforipitoisuuden kasvu Pohjanpitäjänlahdella syksyn 1996 aikana ennen Mustionjoen huuhtoutumien kasvua, aiheutui fosforipitoisemman veden kulkeutumisesta Tammisaaren ulkopuoliselta merialueelta lahtialueelle.

Tulosten perusteella näyttää siltä, että hapetuspumppauksen merkitys ravinteiden siirtäjänä oli vähäinen. Toteutuneen kaltaiselle hapetukselle ei siten ravinteiden kulkeutumista ajatellen ole esteitä jatkossa. Sisäänvirtauksen mukana Pohjanpitäjänlahdelle tulevien ravinteiden merkitys lahden rehevöittäjänä voi sen sijaan toisinaan olla merkittävä. Mikäli sisäänvirtaavassa vedessä fosforipitoisuus on korkeampi kuin itse lahdella, kuten vuonna 1996 pääsääntöisesti oli, vaikuttaa sisäänvirtaus suoraan lahden fosforipitoisuuksia lisäävästi. Sisäänvirtausta tapahtuu mittausten mukaan sekä päällys- että alusveteen. Epäsuorasti sisäänvirtaus vaikuttaa lahden pintaveden fosforipitoisuutta lisäävästi syrjäyttämällä syvänteen pohjan mahdollisesti fosforipitoisempaa vettä ja työntämällä sitä tuottavaan kerrokseen päin.

Tämän tutkimuksen tavoitteena ei ollut lahden ravinnetaseiden ja niiden merkityksen selvittäminen. Jatkossa on kuitenkin tärkeää laskea lahden ravinnetaseet sekä arvioida eri tekijöiden vaikutukset nyt alueelle kehitettyä mallia hyväksikäyttäen. Useimmiten sisäänvirtausta tapahtuu suuremmassa määrin vasta syksyllä, jolloin fosforilisäyksellä ei ole suurta merkitystä levätuotannon kannalta. Mitä enemmän sisäänvirtausta tapahtuu jo kesällä, sitä suurempi vaikutus lisäyksellä voi olla fosforirajoitteisella Pohjanpitäjänlahdella.



Kuva 86. Kokonaisfosforipitoisuus pintavedessä (1–5 m) eri havaintoasemilla syksyn 1996 havaintokerroilla.

## 4.5 Laskentamenetelmien vertailu

### 4.5.1 Regressio-, tase- ja 3D-mallit

Virtauksen ja sitä säätelevien muuttujien välinen tilastollinen regressio-analyysi kuvaa selkeimmin havaintoaineistosta löytyvät riippuvuudet ja niiden voimakkuuden. 3D-mallin avulla puolestaan voidaan kuvata fysikaalisessa ympäristössä tapahtuvien muutosten vaikutus virtauksiin ja veden vaihduntaan.

Happi- ja suolataseiden määrittäminen auttaa havaintoaineiston pohjalta määrittämään taseiden komponenttien keskinäiset suhteet kuten esimerkiksi hapetuspumppauksen suhteen vertikaaliseen sekoittumiseen ja meriveden sisäänvirtaukseen. Tasetarkastelun avulla voidaan laskennallisesti määrittää myös eri komponenttien vaikutukset alusveden happi- ja suolapitoisuuksiin. Tasetarkastelu on välittömästi sidottu olemassaolevaan havaintoaineistoon (pitoisuus-havainnot ja virtausmittaukset). 3D-mallintaminen puolestaan tarjoaa monipuoliset mahdollisuudet virtausten ja fysikaalisen ympäristön happi- ja suolapitoisuusvaikutusten vaaka- ja pystysuuntaiseen laskentaan.

### 4.5.2 Hapenkulutuksen laskentamenetelmät

Keväällä 1996 syksyn 1995 pumppauksen seurantatulosten, ensimmäisten virtausmittausten sekä niihin perustuvien vaihdunta, suola- ja happitaselaskelmiin (ks. luku 2.6) perusteella eriteltiin pumppujen vaikutusta mereltä alusveteen tulevasta vaikutuksesta, arvioitiin pumppauksesta saatavaa hyötyä sekä valmisteltiin päätöstä seuraavan syksyn pumppauksesta. Keväällä 1996 aloitettiin myös virtausten ja veden laadun 3D laskenta Finnflow-Finnqual-ohjelmistolla (luku 2.7). Tästä tutkimuksesta erillään on sovellettu Ekosimu-ohjelmistoa (Lappalainen 1996).

Happitaselaskelmissa happea kuluttivat pohjan hapenkulutus sekä veden hapenkulutus. Molemmat riippuvat happipitoisuudesta ja lämpötilasta. Happitaseen laskennassa ja mallin rakenteessa pyrittiin rajoittumaan vain niihin muuttujiin (suola- ja happipitoisuus) ja prosesseihin (hapenkuluminen, vaihdunta ja vertikaalinen sekoittuminen), jotka olivat mittauksin yksikäsitteisesti määritettävissä.



3D-mallissa happea kuluttivat pohjan hapenkulutus sekä veden hapenkulutus, joka laskettavana tilamuuttujana olivat riippuvaisia perustuotannosta, eri kuormituslähteistä, kulkeutumisvaikutuksista sekä hajoamisnopeudesta. Koska hapenkulutus oli laskettavana tilamuuttujana, 3D-laskenta sopi erityisen hyvin tiedossa olevien pistekuormitusten sekä virtausyhteyksien muutosten vaikutusten laskentaan.

Ekosimu-ohjelmassa hapea kuluttivat veden ja pohjan hapenkulutus, jotka riippuivat BOD-, rehevyys- ja humustekijästä sekä happipitoisuudesta ja lämpötilasta (Lappalainen 1996).

Hapenkulutuskertoimien vertaileminen on hankalaa mallirakenteiden poiketessa toisistaan. Tasemallin alusveden kokonaishapenkulutus pohjankulutus mukaanlukien oli noin  $4,4 \text{ tn vrk}^{-1}$  eli  $0,057 \text{ mg l}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$ . 3D-mallissa hapenkulutus oli samaa suuruusluokkaa. Pohjan hapenkulutuksessa oli eroja, jotka kompensoituivat veden hapenkuluksella. Tasemallissa pohjan hapenkulutus oli  $0,148 \text{ g m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ . 3D-mallissa se vaihteli syvyysvyöhykkeittäin  $0,070\text{--}0,560 \text{ g m}^{-2} \text{ vrk}^{-1}$ . Ekosimu-mallin alusveden hapenkulutus oli em. tilavuuksilla ( $10\text{--}15 \text{ m:n}$  alapuolisen vesikerroksen tilavuus  $76,5\text{--}38 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) ja  $0,075 \text{ mg l}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$  kulutuksella laskien  $5,7\text{--}2,9 \text{ tn vrk}^{-1}$ . Stipan (1994 ja 1996a) määrittämä hapenkulutus  $0,06 \text{ mg l}^{-1} \text{ vrk}^{-1}$  on myös hyvin lähellä tässä tutkimuksessa saatuja arvoja.

Päällysveden pumppauksesta happipitoisuuksiin aiheutuvat vaikutukset johtivat kaikilla menetelmillä hyvin samanlaisiin tuloksiin.

Suolapitoisuuksiin pumppauksesta aiheutuneet vaikutukset olivat 3D- ja taselaskennassa ( $0,5\text{--}1 \text{ g kg}^{-1}$ ) yhtäpitäviä Ekosimu-laskennan kanssa.

## 4.6 Epävarmuustekijät

### 4.6.1 Havaintoaineisto ja tasetarkastelu

Epävarmuutta mittausten perusteella laskettuihin virtauksiin Tammisaaren salmissa aiheutti mittaustarkkuuden lisäksi virtausalojen keskiarvoistaminen kalibroimalla. Suolaisuus- ja tiheyslaskelmiin aiheutti epävarmuutta mittaustarkkuuden lisäksi muunnoskaavojen epätarkkuus. Yleisesti ottaen tasetarkastelua ja 3D-laskentaa varten saatiin varsin kattava ja luotettava aineisto.

Tasetarkasteluun aiheutti epätarkkuutta vesimassan jako kahteen kerrokseen, päällyys- ja alusveteen. Harppauskerrosta ei tasetarkastelussa käsitelty omana kerroksena, koska tämä olisi johtanut hankaluuksiin siihen kohdistuvien merivesipulssien kvantifioinnissa. Harppauskerroksen sijainnin ja jyrkkyyden vaihtelu sekä epävarmuus ilmastimen vaikutusalueen syvyydestä aiheuttivat epävarmuutta hapetuspumppausvaikutuksen arviointiin. Tämän vuoksi vaikutuksia haarukoitiin harppauskerroksen syvyyksillä  $10$  ja  $15 \text{ m}$ .

Hiukkasmaisen orgaanisen aineen (POC) tasetiedot ovat puutteelliset, sillä vuonna 1992 tuli  $18 \%$  kuormituksesta tunnistettavasta lähteestä. Vuonna 1992 Tammisaaren salmissa ja Sälvikin syvänteessä havaitut POC-pitoisuudet ja vuosina 1995–1997 tehtyjen virtausmittausten perusteella arvioitu vaihdunta osoittavat vain karkeasti sen, että merkittävä osa tunnistamatta jääneestä POC-kuormituksesta saattaa tulla sisäänvirtaavan meriveden mukana muualta rannikkoalueelta.

Aineisto alusveden kesäaikaisesta hapenkulutuksesta sekä sitä mahdollisesti säätelevästä, valuma-alueelta tulevasta TOC-kuormituksesta ja veden lämpötilasta on vuosilta 1982–1998. POC-kuormituksesta ja meren POC- ja TOC-pitoisuuksista on havaintoja suppeasti. Syksyn happiminimistä ja alkutalven happimaksimista on tiheämmin havaintoja vuosilta 1990–1998.



#### 4.6.2 3D-laskenta

3D-laskelmat nojaavat moneen mittauksella vajaasti varmistettuihin syöttötietoihin kuten sedimentin hapenkulutus, eloperäisen aineksen vajoamisnopeus ja hapenkulutus. Käytettyihin laskentakertoimiin ja syöttötietoihin voi näin ollen sisältyä epävarmuutta. On mahdollista, että samankaltaisiin tuloksiin olisi ehkä päästy jollakin toisella, toisen vaiheen hapenkulutuksen, pohjalta vapautuvan hapenkulutuksen sekä BOD:n vajoamis- ja kulumiskertoimien yhdistelmällä.

Edellä tarkasteltujen laskentatulosten laskentaperusteiksi syötettiin:

- pohjakertymien hapenkulutukset mittaustulosten perusteella arvioituina,
- biomassan hajoamisen lisävaikutus hapenkulutukseen kolmanneksena sille johdetuista enimmäisarvoista,
- pohjalta alimpaan tarkastelukerrokseen vapautuva sisäinen kuormitus heinäkuulta marraskuulle likimain pohjakertymien välittömän vaikutuksen veroisena,
- vajoamisnopeudet eloperäiselle ainekselle mittaustuloksista johdettujen alimpien arvojen tuntumassa, likimain kymmenkertaisina aiemmin valtaosin liukoiselle BOD:lle käytettyihin nopeuksiin verrattuina,
- sisäisen kuormituksen lisäys runsaan BOD:n ( $0,5\text{--}1,5\text{ mg l}^{-1}$ ) alueilla noin viisinkertaisena pohjakertymien välittömän kulutuksen vaikutuksiin verrattuna ja pitemmälle kuluneen BOD:n ( $0,05\text{--}0,15\text{ mg l}^{-1}$ ) alueilla noin neljänneksenä pohjakertymien välittömästä vaikutuksesta ja vapautuvaksi suoraan syötetystä kuormituksesta.

Toisena varsin myöhään laskentaan tarkennettuna täsmennyksenä oli alle 4 metrin syvyisen yhteyden syöttäminen yhtenäisenä (200 metriä leveänä) mereltä Pohjanpitäjänlahdelle. Loppukorjauksilla mitä ilmeisimmin yhteyttä avarrettiin vähän liikaakin, jolloin aiemmin viivästyneenä, pyöristyneenä ja aliarvioituna näkynyt alusveden happipitoisuuden kohentuminen syksyisin siirtyi hieman ennenaikaiseksi, jyrkkeni tuntuvasti ja toi esiin pitoisuuden kokonaismuutoksen paljolti mittaustulosten mukaisena.

Kolmantena loppuvaiheen lisäyksenä laskentaan syötetty nousu- ja lasku-vesien virtausvaikutusten erottelu näyttää sekä fysikaaliselta taustaltaan että mittaustuloksiin verrattuna vahvasti perustellulta. Sen suhteen tuskin on syytä edellisten kysymysten vahvuisiin varauksiin.

## Tulosten hyödyntäminen ja jatkotoimet

Tämän tutkimusprojektin aikana kehitetty kolmiulotteinen virtaus- ja vedenlaatumalli palvelee jatkossa Pohjanpitäjänlahden alueen vesiensuojelun suunnittelua. Mallin avulla on tarkoitus simuloida vesistön tilan muutoksia erilaisissa hydrologisissa olosuhteissa tai kuormitustilanteissa sekä arvioida eri teknisten toimien vaikutuksia vesistön tilaan, erityisesti happitilanteeseen. Tässä vaiheessa malli soveltuu nimenomaan Pohjanpitäjänlahden happitilanteen simulointiin. Tarkoituksena onkin seuraavana vaiheena hyödyntää mallitarkastelua Pohjanpitäjänlahden happikadon torjuntasuunnitelman viimeistelyssä. Esimerkkejä mahdollisista muista arvioitavista toiminnoista ovat valuma-alueelta tai merialueelta tulevan kuormituksen muutokset ja hydraulisen yhteyden muutokset kuten salmien ja kynnysten syventäminen tai laivaväylien muutokset.

Pohjanpitäjänlahden alusveden hapenkulumiseen vaikuttavissa tekijöissä on vielä runsaasti tuntemattomia tekijöitä. Tämän vuoksi jatkotutkimusaiheeksi esitetään Pohjanpitäjänlahden happea kuluttavan aineen kuormitustaseen ja sen eri komponenttien yksityiskohtaisempaa selvittämistä. Tähän tutkimukseen tulisi kuulua hiilitaseen sekä siihen liittyen myös litoraalialueen tuotannon ja resuspension merkityksen selvittäminen. Niin ikään Pohjanpitäjänlahden ravinnetaseiden tarkempi määrittäminen antaisi oleellista lisätietoa lahden autoktonisen tuotannon arviointiin.

Alusveden hapenkulutusta säätelevän plankton- ja rihmalevätuotannon sekä ravinne- ja hiilitaseiden tarkempi selvittäminen edellyttävät tulevaisuudessa lisähavainnointia, mallien jatkokehitystyötä sekä jo tehtyjen laajojen biologisten tutkimusten (Tvärminnen eläintieteellinen asema) analysoimista vesiensuojelullisesta näkökulmasta yhdessä asianomaisten tutkijoiden kanssa. Happitilanteen seuranta ja ilmastustarpeen ennakoimista varten tulisi luoda reaaliaikainen mitaus- ja seurantajärjestelmä, joka antaisi tarvittavat syöttötiedot malliajoja ja päätöksentekoa varten. Järjestelmän tulisi sisältää meriveden korkeus-, valuma-aluevirtaama- ja tuulitietojen kokoamisen ao. rekistereistä, virtausmittarin Tammissaaren salmissa (1,5 m pohjasta) lämpötila- ja sähkönjohtavuusanturilla varustettuina sekä avovesiaikana noin kerran kuussa tehtävän happi-, lämpötila- ja johtavuusluotauksen Pohjanpitäjänlahden syvänteessä. Havaintotoiminnan tehostaminen myös Stadsfjärdenin alueella on tarpeen Stadsfjärdeniltä Pohjanpitäjänlahdelle tulevan kuormituksen nykyistä tarkemmaksi arvioimiseksi.

Lohjanjärven ja Mustionjoen valuntaennusteiden tarkentamiseksi valuma-alueelle tulisi laatia vesistömalli lähinnä vesivoiman hyväksikäyttäjän ja ympäristöhallinnon yhteistyönä. Mallin avulla voitaisiin ennustaa Pohjanpitäjänlahden tulovirtaamaa ja käyttää ennustetta myös hapetustarpeen arvioimiseen koska tulovirtaaman ja alusveden happitilanteen riippuvuus tunnetaan.

Lisätutkimustarvetta on myös merivesipulssin tulon edistämisen selvittämisessä. Koska Pohjanpitäjänlahden alusveden alkutalven vaihdunta ja happitilanne ovat sitä heikkommat mitä suurempi on syksyinen valuma-alueelta tulevan makean veden virtaama, voitaisiin vaihduntaa edistää tulovirtaamien pienentämisellä. Mahdollisuuksia muuttaa tulovirtaamien sääntelyä ei nykyisten vesioikeudellisten lupien nojalla kuitenkaan käytännössä ole. Liikkumavara Mustion-

joen virtaamien sääntelyssä on hyvin pieni, koska muutokset vaikuttavat välittömästi myös Lohjanjärven vedenkorkeuksiin. Tulovirtaamien pienentäminen lyhytaikaisesti siten, että pulssin tuloa voitaisiin edistää, saattaisi kuitenkin joissain tapauksissa olla mahdollista. Näitä mahdollisuuksia tulisi jatkossa selvittää vesivoiman hyväksikäyttäjän kanssa käyttämällä hyväksi mm. edellä esitettyä ennustemallia sekä hyödyntämällä säännöstelystä saatuja kokemuksia. Lisäksi tulisi varautua arvioimaan hydrometeorologisten muutosten, kuten talvilämpötilan nousun ja sadannan lisääntymisen vaikutuksia Pohjanpitäjänlahden happitaseeseen.

Tutkimushankkeen yhteydessä koottu havaintoaineisto ja kehitetyt mallit on tallennettu CD-ROM:ille aineiston jatkokäsittelyä varten.

# Yhteenveto

Pohjanpitäjänlahti on voimakkaasti kerrostunut, ja sen estuaarikierto on Tammissaarella olevan matalan kynnyksen vuoksi luonnostaan vähäistä. Alusveden vaihtuminen tapahtuu talvella. Ajankohta vaihtelee jonkin verran vuosittain. Jos alusveden uusiutuminen viivästyy alkutalvella, voivat happivarat kokonaan ehtyä, kalaston sekä pohjaeliöstön elinolot ratkaisevasti heikentyä ja sisäinen fosforikuormitus kasvaa. 1990-luvun alussa happitila oli erityisen heikko synnyttäneen tarpeen alusveden hapetuspumppaukseen.

Pohjanpitäjänlahdella kokeiltiin vuosina 1995 ja 1996 alusveden hapettamista kolmella Mixox-tyyppisellä laitteella, jotka pumppaavat hapekasta päälysvettä hapenpuuteesta kärsivään alusveteen. Tämä oli ensimmäinen kerta, kun hapetuspumppausta on käytetty Suomen rannikkoalueilla. Sen sijaan oli olemassa laaja käyttökokemus sisävesien happiongelmien hoidosta. Pohjanpitäjänlahden päälyss- ja alusveden välillä vallitsevan suuren tiheyseron pelättiin haittaavan pumppausta. Hapetuspumppauksen rinnalle käynnistettiin tutkimushanke, jonka tavoitteena oli selvittää mitkä tekijät säätelevät Pohjanpitäjänlahden alusveden vaihduntaa ja happitilaa sekä erottaa pumppauksen ja luonnollisten tekijöiden vaikutukset toisistaan. Tähän pyrittiin määrittämällä ja mallintamalla alusveden vesi-, suola- ja happitaseet. Pumppujen vaikutuksia seurattiin tiiviisti vedenlaatu- ja virtausmittauksin. Lisäksi selvitettiin alusvedessä alkutalvella ilmenevää happiminimiä edeltävät tapahtumat syksyisen happitilanteen ennakoimista varten, jotta pumppauspäättökseen ja sen toimeenpanoon jäisi riittävästi aikaa. Myös pumppauksen vaikutusta ravinteiden siirtymiseen pohjalta levien käyttöön selvitettiin.

Kattava kuva meriveden sisäänvirtauksen määrästä, ajoituksesta ja virtausta säätelevistä tekijöistä saatiin pitkän ja yhtenäisen virtausmittauksen ansiosta. Samanaikaisesti tehdyt veden lämpötilan, sähkönjohtokyvyn, suolaisuuden ja happipitoisuuden luotaukset yhdessä tase- ja mallilaskelmien kanssa mahdollistivat ilmastuksen happipitilannetta parantavan vaikutuksen erottamisen meriveden sisäänvirtauksen vaikutuksesta.

Merivesi virtasi mittausjaksolla keskimäärin  $21 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  Tammisaaren salmista ulospäin. Pohjanläheisessä kerroksessa merivettä virtasi kuitenkin keskimäärin  $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  sisäänpäin. Lokakuun ja huhtikuun välisenä aikana pohjakerroksessa sisäänvirtaava merivesi oli yleensä riittävän tiheää syrjäyttääkseen Pohjanpitäjänlahden vanhan alusveden. Pintakerroksessa veden tiheys oli yleensä aina pienempi kuin lahden alusvedessä, ja vesi virtasi keskimäärin ulospäin.

Virtausmittausaineiston tilastoanalyysin perusteella merkittävimmät Tammisaaren salmissa virtausta lyhyellä aikavälillä (0–15 tuntia) säätelevät tekijät olivat meriveden pinnan korkeusvaihtelu ja valuma-aluevirtaama. Tuulen välitön vaikutus virtaukseen oli Tammisaaren salmissa vähäisempi, mutta Vitsandin salmassa merkittävä. Suolaisuuteen tuulella oli lyhyellä aikavälillä sekä Tammisaarella että Vitsandissa merkittävä vaikutus. Pidemmällä aikavälillä (viikko) merkittävimmät Tammisaaren salmissa virtausta säätelevät tekijät olivat valuma-aluevirtaama ja vedenkorkeuden vaihtelu. Syksyn kerrostumattomaan aikaan otollisimmat olosuhteet suolaisen meriveden sisäänvirtaukselle Tammisaaren salmien pohjan läheisessä kerroksessa oli silloin, kun valuma-aluevirtaama oli pieni, tuuleen sisältyi pohjoisen tai idän suuntainen komponentti ja vedenpinta oli vähintään viikon laskusuunnassa. Vedenpinnan vaihtelun aiheuttama edestakainen meriveden liike lisäsi vaihduntaa koko poikkileikkauksessa. Vitsandissa vedenpinnan nousu sekä etelätuuli kerrostumattomaan aikaan ja länsi-

tuuli kerrostumisesta riippumatta työnsivät pintavirtausta sisäänpäin. Näin ol-  
len valuma-aluevirtaaman ollessa pieni syksyn lounaismyrskyt voivat edesaut-  
taa suolaisen meriveden siirtymistä saaristosta Stadsfjärdenin selälle, josta se  
edelleen tuulen kääntyessä pohjoiseen kulkeutuu Tammisaaren salmien pohja-  
kerroksessa lahtialueelle. Toisaalta myös pohjois- ja itätuuli työnsivät kerrostu-  
misesta riippumatta pohjavirtausta Vitsandissa sisään.

Loppusyksyn ja alkutalven syvänteen happitäydennyksen kannalta on tär-  
keää se, mikä on sisään virtaavan veden tiheys. Sen pitäisi olla suurempi kuin  
syvänteessä olevan veden tiheys. Vuosina 1995 ja 1996 sisään virtaavan veden  
tiheys oli riittävän suuri enimmäkseen osan aikaa lokakuun puolivälistä maalishu-  
tikuuhun asti. Kesällä sisäänvirtauksen tiheys oli ajoittain lähellä syvänteen ti-  
heyttä. Keväällä Pohjanpitäjänlahden estuaari-kierto oli niin heikko, ja jokivir-  
taama työnsi suolaisen meriveden niin kauas kynnysalueen eteläpuolelle, että  
vasta loppusyksystä riittävän suolaista vettä pääsi Tammisaaren ja Vitsandin  
väliselle kynnysalueelle ja sisään lahtialueelle. Alkutalvella valuma-aluevirtaa-  
man nousu saattaa työntää suolaisen veden väliaikaisesti Tammisaaren etelä-  
puolelle ja estää syvänteen happivaraston täydentymisen kannalta riittävän ti-  
heän veden virtaamisen Tammisaaren pohjoispuolelle.

1980- ja 1990-lukujen jokivirtaama- ja kuormitustietojen sekä Pohjanpitä-  
jänlahden lämpötila- ja happipitoisuushavaintojen analyysi osoitti, että syksyi-  
nen valuma-alueen vesitilanne sekä erityisesti Mustionjoen juoksutus vaikutta-  
vat ratkaisevasti alusveden vaihduntaan ja happitilan kehitykseen. Mitä suu-  
rempi juoksutus on, sitä myöhempään alusveden happivarasto uusiutuu, sitä  
alemmas syksyinen happipitoisuus alusvedessä laskee ja sitä hitaammin happi-  
pitoisuus nousee ylös. Valuma-alueelta tuleva orgaanisen aineen kuormitus ja  
alusveden lämpötila eivät selittäneet kesän hapenkulutuksen vaihtelua.

Pohjanpitäjänlahden alusveden vaihdunta on samalla lailla riippuvainen  
valuma-alueelta tulevasta jokivirtaamasta kuin Tanskan salmista talviaikaan tu-  
leva ja Itämeren alusveden happivaroja täydentävä suolaisen meriveden sisään-  
virtaus (Schinke ja Matthäus 1998). Vesistöjen säännöstelystä ja sadannan kas-  
vusta johtuva talviaikaisen jokivirtaamien kasvu on niin Pohjanpitäjänlahden  
kuin Itämerenkin alusveden vaihduntaa ratkaisevasti hidastava tekijä. SILMU-  
ilmastonmuutosennusteisiin pohjautuvan valuntaennusteen (Vehviläinen ja  
Huttunen 1997) mukaan Etelä-Suomen talviaikaiset (syyskuun alusta maaliskuun  
loppuun) virtaamat kasvavat 25–60 % vuoteen 2100 mennessä. Jos maapallon  
ilmasto lämpiää odotetulla tavalla, saattaa siitä olla seurauksena Pohjanpitäjä-  
lahden alusveden syksyisessä happitilassa pysyvä muutos huonompaan suun-  
taan.

Alusveden syksyn ja alkutalven happitaseesta hapetuspumppaus ( $2\,100\text{ kgO}_2\text{ vrk}^{-1}$ ) oli noin kolmannes meriveden sisäänvirtauksesta ( $6\,700\text{ kgO}_2\text{ vrk}^{-1}$ ) ja puo-  
let vedessä ja pohjalla tapahtuvasta hapenkulutuksesta ( $4\,500\text{ kgO}_2\text{ vrk}^{-1}$ ). Vuosi-  
na 1995 ja 1996 hapetuspumppauksella oli selvä alusveden happitilaa parantava  
vaikutus. Vuonna 1996 hapetuspumppaus nosti alusveden keskimääräistä hap-  
pipitoisuutta parhaimmillaan  $1,1\text{--}2,0\text{ mg l}^{-1}$  ja alensi suolaisuutta  $0,5\text{--}0,9\text{ g kg}^{-1}$ .  
Hapetuspumppausta kannattaa tulevana vuosina jatkaa, jos happi uhkaa loppua  
alusvedestä.

Hapetuskokeilun alkaessa pelättiin pumppujen kierrättävän fosforipitoisem-  
paa vettä pohjalta pinnalle levien käyttöön. Syksyllä 1995 pohjanläheisen vesi-  
kerroksen fosforipitoisuus oli korkeampi kuin päällysveden. Suolaisemman me-  
riveden syrjäyttäessä tämän vesimassan se siirtyi ylemmäs ja nosti päällysveden  
fosforipitoisuutta. Hapetuspumpuilla saattoi olla vähäinen fosforisiirtymää tu-  
keva vaikutus. Syksyllä 1996 vastaavaa eroa alusveden ja päällysveden fosfori-  
pitoisuuksissa ei ollut, joten pumppauksella ei silloin voinut olla merkitystä ra-  
vinteiden siirtäjänä. Todennäköisesti fosforiravinteita siirtyy tuottavaan kerrok-



seen enemmän Tammisaaren edustalta lahdelle sisään virtaavan meriveden mukana kuin esim. pumppauksen vaikutuksesta. Mitä enemmän sisäänvirtausta tapahtuu jo kesällä, sitä merkittävämmän se voi lisätä tuotantoa fosforirajoitteisella Pohjanpitäjänlahdella.

Tutkimusprojektin aikana saadut tutkimustulokset ja kehitetty kolmiulotteinen virtaus- ja vedenlaatumalli palvelevat jatkossa Pohjanpitäjänlahden alueen vesiensuojelun suunnittelua. Tässä vaiheessa tärkeimpänä sovelluskohteena on happitilanteen simulointi erilaisissa tilanteissa sekä sen hyödyntäminen Pohjanpitäjänlahden happikadon torjuntasuunnitelman viimeistelyssä. Tärkeänä sovelluskohteena mallille on myös erilaisten toimien, kuten pohjakynnyksen syventämisen ja tulovirtaaman säätelyn vaikutusten arviointi.

Tärkeimpinä jatkotutkimushankkeina esitetään reaaliaikaisen seurantajärjestelmän ja valuma-aluemallin kehittämistä hapetuspumppaustarpeen riittävän aikaiseksi toteamiseksi. Mahdollisuudet edistää merivesipulssien sisäänvirtausta joko jokivirtaamaa säännöstelemällä tai Tammisaaren salmia syventämällä tulisi myös jatkossa selvittää. Pohjanpitäjänlahden happea kuluttavan aineen kuormituksen komponenttien tarkempi selvittäminen olisi tärkeää vähentämistopiteiden oikeaksi kohdentamiseksi. Tähän kuuluisi mm. meriveden sisäänvirtauksen, litoraalialueen tuotannon ja resuspension vaikutuksen määrittäminen. Lahden ravinnetaseiden selvittäminen olisi myös tärkeää ja mahdollistaisi eri kuormituslähteiden merkityksen nykyistä tarkemman arvioinnin.



## Sammandrag

Pojoviken är kraftigt skiktad, och estuariecirkulationen blockeras av den grunda tröskeln vid Ekenäs. Vattnet i det undre skiktet byts ut på vintern. Tidpunkten varierar från år till år. Om förnyelsen av vattnet i de djupare skikten sker först på vintern, kan syretillgångarna sina helt. Då försämrars förhållandena för fisken och botten djuren på ett avgörande sätt. Också den inre fosforbelastningen växer då. I början av 1990-talet var syreförhållandena synnerligen dåliga, vilket lyfte fram behovet att syresätta djupvattnet genom pumpning av syrerikt ytvatten.

I Pojoviken utfördes syresättningsexperiment under åren 1995 och 1996 med tre apparater av typen Mixox, som pumpade syrerikt vatten från ytskiktet till det av syrebrist lidande djupare delarna av viken. Samtidigt med syrepumpningen inleddes ett forskningsprojekt, vars syfte var att klarklägga de faktorer som reglerar vattenutbytet och syreförhållandena i de undre skiktet samt att skilja de naturliga faktorerna från pumpningens effekter. För detta ändamål utfördes med korta mellanrum vattenkvalitets- och strömningsmätningar. Vatten-, salt- och syrebalansen undersöktes med både mätningar och modellering. Dessutom utreddes de händelser och förhållanden som föregick årets syreminimum i början av vintern, för att myndigheterna i god tid skulle kunna förutse hur höstens syresituation utvecklas och därmed hinna fatta beslut om syrepumpningar och verkställa det. Dessutom utreddes i vilken mån pumpningen bidrar till att överföra näringsämne från botten upp till algernas förfogande.

Under mätningsperioden strömmade det i genomsnitt  $21 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  vatten ut ur sunden vid Ekenäs mot havet. Samtidigt strömmade det i de botten nära skikten i genomsnitt  $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  havsvatten inåt. Under tiden oktober-april hade det inåtströmmande havsvattnet i allmänhet tillräckligt stor täthet för att tränga undan det gamla djupvattnet i Pojoviken. I ytskiktet var vattnets täthet i allmänhet mindre än i vikens undre skikt, och vattnet strömmade vanligtvis utåt.

En statistisk analys av data från strömningsmätningarna visar att de viktigaste faktorerna som på kort sikt (0 - 15 timmar) reglerar strömningarna i sunden vid Ekenäs var vattenståndsvariationerna i havet samt flödet från avrinningsområdet. Vindens omedelbara verkningar var små i sunden vid Ekenäs men betydande i sundet vid Vitsand. Vinden påverkade också betydligt salthalten, både vid Ekenäs och vid Vitsand. På något längre sikt (cirka en vecka) reglerades strömningarna i sunden vid Ekenäs främst av flödet från avrinningsområdet och av vattenståndsvariationerna. Den mest gynnsamma tidpunkten för nytt salthaltigt vatten att tränga in i Pojoviken var då, när vattnet är oskiktat, när flödet från avrinningsområdet var litet, när vinden hade en nordlig eller östlig komponent samt när vattenytan hade varit sjunkande i minst en vecka. Vattenståndsvariationerna innebar att havsvattnet rörde sig fram och tillbaka, vilket ökade vattenutbytet i hela tvärsektionen. I Vitsand var det den stigande vattenytan samt vindförhållandena - sydvinden under den ostratifierade tiden och västlig vind oberoende av stratifieringen - som tryckte ytströmningen inåt. Därmed kunde de sydvästliga stormarna på hösten bidra till att det salta havsvattnet strömmade från skärgården till Statsfjärden, så att det, när vinden vände, kunde strömma vidare genom bottenkiktet i sunden vid Ekenäs in i själva Pojoviken. Å andra sidan trycktes bottenströmningen vid Vitsand inåt vid nordlig och östlig vind, oberoende av stratifieringen.

En viktig faktor som påverkar syretillskottet till bottenkiktet på hösten och förvintern är det inströmmande vattnets täthet. För att vattenutbytet skall kunna äga rum, bör det inströmmande vattnets täthet vara större än vattnets täthet i

bottenskiktet. Under 1995 och 1996 var det inströmmande vattnets täthet i de bottennära skikten tillräckligt stort större delen av tiden mellan mitten av oktober och april. Under sommaren var det inströmmande vattnets täthet tidvis nära det undre vattenskiktets täthet. På våren var estueriecirkulationen så svag, och åvattenflödet trängde det salta havsvattnet så långt ut söder om tröskelområdet, att först på senhösten kunde tillräckligt med salt vatten strömma in till tröskelområdet mellan Ekenäs och Vitsand samt vidare till Pojoviken. I början av vintern kan ökningen av flödet från avrinningsområdet temporärt tränga det salta havsvattnet ut söder om Ekenäs och därmed hindra inflödet av vatten med tillräckligt hög täthet till området norr om Ekenäs så att syretillskottet till vikens djupare vattenskikt ytterligare fördröjs.

I undersökningen analyserades också tidigare data (från 1980- och 1990-talet): vattenföringen i ån, belastningen, temperaturen och syrehalten. Avtappningen från Lojo sjö till Svartån påverkar på ett avgörande sätt vattenutbytet i Pojovikens undre vattenskikt och utvecklingen av syresituationen på hösten och förvintern. Ju större avtappningen är, desto lägre blir syrehalten i det undre vattenskiktet på hösten och desto långsammare ökar syrehalten.

På samma sätt som inflödet av saltvatten genom de Danska sunden under vintern, och därmed förnyelsen av syretillgångarna i Östersjön, är beroende av utflödet, är också vattenutbytet i Pojovikens djupare delarna beroende av inflödet från avrinningsområdet. Enligt vissa prognoser kommer avrinningen under vintertiden (från början av september till slutet av mars) i Södra Finland att öka med 25-60 % fram till år 2100. Om så händer, kan det leda till en bestående försämring av syretillståndet i Pojovikens undre vattenskikt under hösten.

Om man jämför komponenterna i det undre vattenskiktets syrebalans under hösten och förvintern, var pumpningen ( $2100 \text{ kgO}_2\text{d}^{-1}$ ) en tredjedel av inflödet med havsvatten ( $6700 \text{ kgO}_2\text{d}^{-1}$ ) och hälften av syreförbrukningen i vattnet och botten ( $4500 \text{ kgO}_2\text{d}^{-1}$ ). Under åren 1995 och 1996 hade pumpningssyresättningen en tydlig positiv effekt på syretillståndet. Under år 1996 kunde man genom pumpningar öka syrehalten i det undre skiktet som bäst med  $1,1\text{-}2,0 \text{ mg l}^{-1}$ , medan salthalten minskade med  $0,5\text{-}0,9 \text{ g kg}^{-1}$ . Det lönar sig att fortsätta med syresättningspumpningar under kommande år, då syret hotar att ta slut i det undre vattenskiktet.

Det kunde inte konstateras att syresättningspumpningarna skulle ha ökat näringsaltsirkulationen från botten till ytan, och algarna som finns där. Däremot kan det inströmmande havsvattnet föra med sig näringsämnen, bl.a. fosfor, från havsområdet vid Ekenäs. Ju mera inflödet sker redan under sommaren, desto mer kan det öka produktionen i Pojoviken där fosfor är den begränsande minimifaktorn.

Resultat från dessa undersökningar kan i fortsättningen användas i planeringen av vattenskyddet i Pojoviksområdet. I detta skede är den viktigaste tillämpningen simulering av syretillståndet i olika slags situationer, vilket bidrar till att färdigställa en aktionsplan för förebyggandet av syrebristen i Pojoviken. Andra viktiga tillämpningar i fortsättningen kommer att handla om utvärdering av effekterna av olika slags åtgärder, bl.a. fördjupandet av bottenströskeln vid Ekenäs och reglerandet av inflödet från avrinningsområdet.

## Summary

Pohjanpitäjänlahti, also known by its Swedish name Pojoviken, is a steeply stratified body of brackish water. Due to a shallow threshold at the town of Tammisaari (Ekenäs), its natural estuary circulation is weak. The water exchange of the hypolimnion takes place in the winter. If the oxygen replenishment of the hypolimnion is much delayed, the oxygen reserves may be entirely exhausted, which means radically deteriorated living conditions for fish and the benthos. The phosphorus load will also be increased. In the early 1990's, the oxygen conditions were unusually poor, and the need of oxygenation pumping was brought into discussion.

An oxygenation experiment was made in 1995 and 1996 in the Pohjanpitäjänlahti inner estuary. Three devices of the type Mixox were used to pump oxygen-rich epilimnion water into the oxygen-depleted hypolimnion. Parallely with the artificial oxygenation, a research project was launched, with the objective to identify the factors regulating the water exchange of the hypolimnion of the estuary and to distinguish the effects of the pumping from natural factors. For this purpose, frequent measurements of water quality and currents were made. The water balance as well as the salinity and oxygen balances were studied both by monitoring and by modelling. Much attention was paid to the conditions preceding an early winter minimum of oxygen concentration, as such a development should be identified at an early stage so that a decision about pumping could be made and put in practice before it is too late. The possible effects of pumping on the nutrient circulation from the bottom to the algae-growth layers were also studied.

During the measuring period, the average flow outwards through the narrows at Tammisaari was  $21 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Near the bottom, however, there was an average flow of  $4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  inwards to the estuary. Between October and April, the inflowing sea water was usually dense enough to replace the old hypolimnion water. In the surface layer, the density was usually smaller than in the hypolimnion of the estuary, and the average direction of the flow was outwards.

A statistical analysis of the current measurements suggests that in a short time scale (0 to 15 hours) the most important factors regulating current patterns in the narrows at Tammisaari were the sea water level variations and the outflow from the catchment. The immediate effect of the wind on the currents was rather weak in the narrows at Tammisaari but significant in the narrows at Vitsand. In a longer time scale (one week), the most important factors regulating the currents in the narrows at Tammisaari were the catchment outflow and the sea level variations. During the unstratified period in the autumn, the most favourable circumstances for saline water inflow through the bottom-near layer occurred when the catchment outflow was small, when the wind had an eastern or northern component, and when there had been at least one week of decreasing sea water level. The oscillatory motion induced by the sea level variations increased the water exchange in the whole cross section. At Vitsand, if the catchment flow was small enough, the surface currents were pushed inwards by south winds during the unstratified period and by west winds in all stratification patterns; the water level variations also increased the inflow in the whole cross section. The south-westerly storms of the autumn do thus promote the water exchange of the estuary: in such conditions the saline water will flow into the outer estuary area (Stadsfjärden), and when the wind shifts, it will flow further through the narrows at Tammisaari into the inner estuary area. On the other hand, during north and east

winds there was at Vitsand, independently of the stratification, a bottom flow inwards.

For the oxygen replenishment of the hypolimnion in the late autumn and the early winter, the density of the inflowing water is essential: it should be denser than the water in the hypolimnion. In 1995 and 1996, the inflowing water in the bottom-near layer was dense enough during most of the time from the mid of October to April. During the summer, the inflow density was usually clearly below the density of hypolimnion water. During the spring, the estuary circulation was so weak, and the catchment flow pushed the saline water so far south beyond the threshold area, that the sufficiently saline water could not enter the threshold area between Vitsand and Tammisaari (and further into the inner estuary) until the late autumn or early winter. In early winter, the catchment flow is sometimes increased so that the saline water is pushed temporarily south of Tammisaari, and the inflow of sufficiently saline water is prevented, which also prevents the oxygen replenishment of the hypolimnion in the inner estuary.

Beyond the data collected during the research project, there were also available records of discharge, loading, temperature and oxygen concentration from the 1980's and 1990's. An analysis of these records indicates that the release of water from the lake Lohjanjärvi into the river Mustionjoki (Svartån) has a decisive effect on the water exchange of the hypolimnion in the estuary and on the development of the oxygen regime in the late autumn and the early winter. The greater the water release is, the later will be the oxygen replenishment of the hypolimnion and the slower will be the increase of the oxygen concentration.

The water exchange of the hypolimnion of the inner Pohjanpitäjänlahti estuary is similarly dependent on the catchment flow as is the wintertime saline water inflow through the Danish Sounds which is essential for the replenishment of oxygen conditions of the Baltic Sea. As the Baltic Sea, the Pohjanpitäjänlahti estuary is supposed to be affected by the climatic change. According to a prognosis, the winter time (September to April) mean discharge will increase by 25 to 60 % until the year 2100. If so happens, the autumntime oxygen conditions in the Pohjanpitäjänlahti hypolimnion will deteriorate.

Compared with other components of the oxygen balance of the hypolimnion in the autumn and the early winter, pumping ( $2100 \text{ kgO}_2 \text{ d}^{-1}$ ) was about one third of the oxygen inflow with saline water ( $6700 \text{ kgO}_2 \text{ d}^{-1}$ ) and about half of the oxygen consumption in the water and in the bottom ( $4500 \text{ kgO}_2 \text{ d}^{-1}$ ). During 1995 and 1996, oxygenation had a distinct positive effect on the oxygen regime of the hypolimnion. In 1996, the pumping increased the oxygen concentration by  $1,1\text{--}2,0 \text{ mg l}^{-1}$  at its best, while the salinity was decreased by  $0,5\text{--}0,9 \text{ g kg}^{-1}$ . There is reason to consider pumping even in the future, whenever there seems to develop an oxygen shortage in the hypolimnion.

It could not be found that oxygenation pumping would increase the circulation of nutrients from the bottom to the surface layer where they would be available for algae. On the other hand, inflowing sea water can bring along phosphorus nutrients from the sea area south of Tammisaari. The more such inflow takes place already in the summer, the more it may increase the production in the Pohjanpitäjänlahti inner estuary where phosphorus is a critical factor.

The results acquired can be applied in developing the water pollution control in the Pohjanpitäjänlahti region. Currently the most important application will be simulating the oxygen conditions in various situations. These results will be used in establishing the oxygen deficiency prevention programme for the Pohjanpitäjänlahti inner estuary. Other important application will be evaluating the effects of various actions, such as deep dredging the bottom threshold or regulating the incoming discharge.



# Kirjallisuus

- Alenius P., Myrberg K. & Nekrakov A. 1998. The physical oceanography of the Gulf of Finland: a review. *Boreal Environment Research* 3:97-125.
- Bennett, A., S. 1976. Conversion of in situ measurements of conductivity and salinity. *Deep-Sea Research*, 23: 157-165.
- Dauphinee, T., M. & Klein, H., P. 1977. The effect of temperature on the electrical conductivity of seawater. *Deep-Sea Research*, 24: 891-902.
- Dyer, K. R., 1973. *Estuary-a Physical Introduction*, Wiley. 140 s.
- Frisk, T. & Nyholm, B. 1980. Lämpötilan vaikutuksesta reaktionopeuskertoimiin vedenlaatumalleissa. *Vesitalous* 21(5): 24-27.
- Granberg, K. 1996. Perustuotannosta, bakteerituotannosta ja metaanin tuotannosta. *Laskentaesimerkkejä*, Jyväskylä, Keski-Suomen ympäristökeskus. 28 s.
- Hill, K., D. & Dauphinee, T., M. 1986. The extension of the practical salinity scale 1978 to low salinities. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-11,1:109-111.
- Heiskanen, A.-S. 1992. Vedessä vajoavan aineksen mittaamenetelmä. Julk. Mäkelä, A., Antikainen, S., Mäkinen, I., Kivinen, J. & Leppänen, T. (toim.): *Vesientutkimusten näytteenottomenetelmät. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja B 10*: 82-86.
- Heiskanen, A.-S. & Leppänen, J.-M. 1995. Estimation of export production in the coastal Baltic Sea: Effect of resuspension and microbial decomposition on sedimentation measurements. *Hydrobiologia* 316:211-224.
- Heiskanen, A.-S. 1998. Factors governing sedimentation and pelagic nutrient cycles in the northern Baltic Sea. *Monographs of the Boreal Environment Research* 8: 1-80.
- Heiskanen, A.-S. & Tallberg, P. 1999. Sedimentation and particulate nutrient dynamics along a coastal gradient from a fjord-like bay to the open sea. In: Blomqvist, E.M., Bondsdorff, E. and Essink, K. (eds.), *Biological, physical, and geochemical features of enclosed and semi-enclosed marine systems. Hydrobiologia* 393: 127-140.
- Holmberg, R. & Jokinen, O. 1996. Mustionjoen, Fiskarsinjoen, Pohjanpitäjänlahden ja Tammisaaren merialueen yhteistarkkailun yhteenveto vuodelta 1995. Lohja, Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Julkaisu 57. 47 s.
- Holmberg, R. & Jokinen, O. 1997. Mustionjoen, Fiskarsinjoen, Pohjanpitäjänlahden ja Tammisaaren merialueen yhteistarkkailun yhteenveto vuodelta 1996. Lohja, Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Julkaisu 72. 45 s.
- Holmberg, R. 1997: Mustionjoen alajuoksun, Pohjanpitäjänlahden ja Tammisaaren merialueen kalataloudellinen tarkkailu 1994-1995. Lohja, Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Julkaisu 64. 31 s.
- Holmberg, R., Jokinen, O., Kuosa, H. & Ranta, E. 1999: Mustionjoen, Fiskarsinjoen, Pohjanpitäjänlahden ja Tammisaaren merialueen yhteistarkkailun yhteenveto vuodelta 1997. Lohja, Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Julkaisu 86. 43 s.
- Jenkins, G. M. & Watts, D. G. 1969. *Spectral analysis and its applications*. Holden-Day, San Francisco.
- Kajosaari E. 1981. *Vesihuolto*. Helsinki, Suomen rakennusinsinööri liitto. RIL 124. s. 212.
- Kauranne, T. 1983. Computer program documentation for the lake model FINNECO and the river model QUAL-II. Helsinki, Vesihallitus. Vesihallituksen monistesarja 163. 425 s.
- Kiirikki, M., Haapamäki, J., Koponen, J., Ruuskanen, A. & J. Sarkkula 1998. Linking the growth of filamentous algae to the 3D ecohydrodynamic model of the Gulf of Finland. *Environmental Modelling & Software* 13, 6:503-509.
- Koponen, J., Alasaarela, E., Lehtinen, K., Sarkkula, J., Simbierowicz, P., Vepsä, H. & Virtanen, M. 1992. *Modelling the Dynamics of a Large Sea Area*. Helsinki, National Board of Waters and the Environment. Publications of the Water and Environment Research Institute 7.
- Koponen, J., Virtanen, M., Vepsä, H. & Alasaarela, E. 1994. Operational model and its validation with drift tests in water areas around the Baltic Sea. *Water Pollution Research Journal of Canada*, 29(2/3): 293-307.

- Koponen, J. 1997. Rauman edustan virtaus- ja vedenlaatumalli. Menetelmien ja tulosten kuvaus. Otaniemi, Suomen Ympäristövaikutusten Arviointikeskus Oy. 19 s.
- Koponen, J. & Ylinen, H. 1998. Olkiluotoon suunnitellun uuden voimalayksikön jäähdytysvedestä merialueelle aiheutuvien vaikutusten laskenta. Alustava selostus, Suomen Ympäristövaikutusten Arviointikeskus Oy, Espoo, 3. marraskuuta 1998. 29 + 28 s.
- Kristoffersson, R., Niemi, Å. & Pokki, J. 1994. Tvärminnen eläintieteellisen aseman tutkimusalueeseen kuuluvan Pohjanpitäjänlahden biologisen tilan ja sen vuotuisvaihtelun perusselvitys. Loppuraportti 31.3.1994. Helsingin yliopisto moniste. 47 s. + 20 liitesivua.
- Lappalainen, K.-M. 1996. Raportti Pohjanpitäjänlahden koehapetuksesta syksyllä 1995, Kuopio, Vesi-Eko Oy.
- Launiainen, J., 1972. Pohjanpitäjänlahden hydrografiasta 1971, Gradu-työ. Helsinki, Helsingin yliopisto, Geofysiikan laitos.
- Lauri, H. & Virtanen, M. 1995. Mallitarkastelu hapettimien vaikutuksesta Kallaveden veden laatuun: Tutkimusselostus. Otaniemi, Suomen Ympäristövaikutusten Arviointikeskus Oy, 27. joulukuuta 1995. 61 s.
- Mettinen, A. 1998. Pohjanpitäjänlahden, Tammisaaren merialueen, Mustionjoen ja Fiskarsinjoen yhteistarkkailun pohjaeläintutkimukset vuodelta 1997. Pohjaeläimistön muuttuminen vuodesta 1985. Lohja, Länsi-Uudenmaan vesi ja ympäristö ry. Julkaisu 76. 64 s.
- Pickard, G. L. & Emery, W. J. 1964. Descriptive Physical Oceanography – 5th ed. Oxford, Butterworth-Heinemann.
- Pokki, J. & Holmberg, R. 1996. Pohjanpitäjänlahden syvänteen hapetuskokeilun vesistöseuranta syksyllä 1995. Julkaisematon raportti. Tvärminne, Tvärminnen eläintieteellinen asema ja Länsi-Uudenmaan vesi- ja ympäristö ry. 4 s. + 11 liitesivua.
- Priestley M., B. 1981. Spectral analysis and time series. Volumes 1 and 2. Academic Press, New York.
- Pritchard, D.W. 1952. Estuarine hydrography. Advances in Geophysics, 1, 243-280.
- Reichert, P. 1994 a. AQUASIM – A tool for simulation and data analysis of aquatic systems. Water Science and Technology 30(2): 21-30.
- Reichert, P. 1994 b. Concepts underlying a computer program for the identification and simulation of aquatic systems. Switzerland, Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG). Schriftenreihe der EAWAG Nr. 7. 386 s.
- Reichert, P. 1995. Design techniques of a computer program for the identification of processes and the simulation of water quality in aquatic systems. Environmental Software 10(3):199-210.
- Räike, A., Pietiläinen, O.-P. & Pitkänen, H. 1998. Typpikuormituksen vaikutus Lohjanjärven ja sen alapuolisen vesialueen tilaan. Helsinki, Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö 188. 50 s.
- Schinke, H. ja Matthäus, W. 1998. On the causes of major Baltic inflows – an analysis of long time series. Contal Shelf Research 18(1):67-97.
- Seuna, P., 1971. Suomen vesistöalueet: Ehdotus vesistöalueiden yleisjaoksi ja vesistötunnuksiksi. Helsinki, Vesihallitus. Tiedotus 10. 53 s.
- Stipa, T. 1994. Pohjanpitäjänlahden vedenvaihdunta ja sen vaikutukset hapen ja ravinteiden dynamiikkaan. Pro gradu. Helsinki, Helsingin yliopisto, Geofysiikan laitos.
- Stipa, T. 1996 a. Water renewal and vertical circulation of Pohja Bay. Helsinki, Helsinki University, Department of Geophysics. Report series in geophysics, No 34.
- Stipa, T. 1996 b. Pohjanpitäjänlahden sekoittumistilanne vuonna 1995. Raportti Suomen ympäristökeskukselle 19.2.1996. Espoo, Hydrosafia T:mi.
- Tallberg, P. & Heiskanen, A.-S. 1998. Species-specific phytoplankton sedimentation in relation to primary production along an in-shore-offshore gradient. Journal of Plankton Research 20 (11): 2053-2070.
- UNESCO 1973. International Oceanographic tables, Vol. 2. National Institute of Oceanography of Great Britain. 141 s.
- UNESCO 1981. The practical salinity scale 1978 and the International equation of state of seawater 1980. Unesco Technical papers in marine science 36. Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. 25 s.



- Van Rijn, L.C. 1989. Handbook. Sediment transport by currents and waves. Netherlands, Delf Hydraulics. Raport H 461.
- Vehviläinen, B. & Huttunen M. 1997. Climate change and water resources in Finland. Boreal Environment Research 2:3-18.
- Virta, J. 1977. Estimating the Water and Salt Budgets of a Stratified Estuary. Nordic Hydrology, 8:11-32
- Virta, J. 1978. Long internal waves in the Pohjanpitäjänlahti Estuary. Aqua Fennica 8: 3-11.
- Virtanen, M., Vepsä, H. & Jorma Koponen 1993. Development of local model applications in the Gulf of Bothnia. Aqua Fennica 23(2):259-269.
- Witting, R., 1914. Kort översikt af Pojovikens hydrografi, Fennia, 35(1):3-18.
- Vuoriranta, P. & Saloniemi, M. 1996. Paperi- ja kartonkitehtaan biologisesti käsitellyn jäteveden potentiaalinen biohajoavuus. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Vesi- ja ympäristötekniikan laboratorio. Testausselostus 28. marraskuuta. 10 s.
- Vuoriranta, P. 1997. Pohjanpitäjänlahden alus- ja päällysviesien ja Metsä-Serlan Kirkniemen tehtaiden jäteveden sekoitussuhteiden hapen ja orgaanisen hiilen kulumistestejä 18.9.-17.11.1997. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Vesi- ja ympäristötekniikan laboratorio. Alustava aineisto- ja tulokooste 1. joulukuuta. 5 s.
- Väisänen, T. & Hellsten, S. 1997. Pohjanpitäjänlahden hapenkulutuksen mittausta ja laskenta. Oulu, VTT. VTT:n tutkimusselostus YKI652/97. [Julkaisematon] 5 s. + 13 liitesivua.

## **Liite I. Suunnitelmia ja selvityksiä sekä suojeluhankkeita Pohjanpitäjänlahden alueella**

- Project Aqua -ohjelma. Unescon kansainvälinen biologinen ohjelma (IBP) 1969 ja 1971.
- Pohjanpitäjänlahden ja sen edustan vesiensuojelusuunnitelma. Vesihallitus 1980, Vesihallituksen julkaisuja 31, 1980.
- Tammisaaren saaristoprojekti. Vesi- ja ympäristöhallitus 1989, Vesi- ja ympäristöhallituksen julkaisuja, sarja A 37, 1989.
- Esitys erityissuojelua vaativiksi vesialueiksi. Maa- ja metsätalousministeriön suojeluvesityöryhmä. Komiteanmietintö 1977:49 sekä Työryhmän mietintö 63/1992, Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto 1992.
- Valtakunnalliset rantojensojelu- ja lintuvesikohteet Pohjanpitäjänlahdella. Valtioneuvoston päätös valtakunnallisesta rantojensojeluohjelmasta 20.12.1990, Valtakunnallinen lintuvesiensuojeluohjelma, komiteanmietintö 1981:32
- Pelastakaa Pohjanpitäjänlahti -työryhmän toimenpideohjelma vuoteen 2000 Pohjanpitäjänlahden pelastamiseksi. Käsitelty ja esitelty mm. Pohjanpitäjänlahti-seminaareissa. Julkaisut: Läntisen Uudenmaan seutukaavaliitto 1992 ja Uudenmaan liitto julkaisuja E6-1994.
- Länsi-Uudenmaan vesihuollon alueellinen yleissuunnitelma 1995. Suunnitelmaraportti Maa ja Vesi Oy, Uudenmaan ympäristökeskus, 1995.
- Karjaanjoen vesistön käytön ja suojelun yleissuunnitelma, Uudenmaan ympäristökeskuksen julkaisuja 1, 1995.
- Pohjanpitäjänlahden vesiensuojeluprojekti, käynnistetty Uudenmaan ympäristökeskuksen toimesta vuonna 1996. Projekti jatkuu edelleen, raportti toimenpide-ehdotuksineen projektin päätyttyä.
- Maisemanhoito, vesiensuojelu ja maatalouden ympäristötuet Mustionjokilaaksossa. Yrjö Ala-Heikkilä 1997. Uudenmaan ympäristökeskuksen julkaisuja 10, 1997.
- Maatalouden vesiensuojelu Pohjanpitäjänlahden ympäristössä. Irmeli Ah-tela 1998. Uudenmaan ympäristökeskuksen monisteita 37, 1998.
- Tammisaaren ja Hangon saariston ja Pohjanpitäjänlahden merensuojelua-lue. Ehdotus Suomen Natura 2000 -verkostoksi. Valtioneuvoston päätös 20.8.1998.
- Maankäytön ja vesiensuojelun ohjauskeinojen yhteensovittaminen. Uu-denmaan liiton vetämä, vuonna 1999 päättynyt hanke, mukana myös Ym-päristöministeriö, Uudenmaan ympäristökeskus, alueen kunnat ja keskei-set intressiryhmät.

## Liite 2. Kolmiulotteisen mallin laskentaperusteet

### 1 Kulkeutumisen ja veden laadun laskenta

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u^s \frac{\partial c}{\partial x} - v^s \frac{\partial c}{\partial y} - w^s \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + qL + R(T, c, \dots)$$

missä

- $c$  = tarkasteltavan muuttujan pitoisuus tai väkevyys  
 $u^s, v^s, w^s$  = kulkeutumisnopeudet x- ja y-suuntiin sekä ylöspäin  
 $D_x, D_y, D_z$  = sekoittumiskertoimet x-, y- ja pystysuuntiin  
 $qL$  = kuormittavat päästöt (pistelähteistä P, jokien mukana R, valuma-alueelta D, pohjasta B ja ilmakehästä A)  
 $R$  = luontaisten, kullekin muuttujalle ominaisten (biogeo-kemiallisten) reaktioiden vedessä aiheuttamat muutokset.

$$\begin{aligned} (u^s, v^s, w^s)_n &= 0 && \text{rannalla} \\ (D_x, D_y, D_z)_n &= 0 && \text{rannalla} \\ qL_R &= Q \beta c_{in} && \text{tulovirtauksissa} \\ qL_B &= E_0 + E_1 + E_2 && \text{pohjalla} \end{aligned}$$

missä

$$\begin{aligned} (x, y, z)_n &= \text{vektorin } (x, y, z) \text{ rantaa vastaan kohtisuora osa} \\ c_{in} &= \text{tulovirtaaman } Q \text{ pitoisuus tai väkevyys} \\ E_i t &= \text{sisäisen kuormituksen vapautumistahteja.} \end{aligned}$$

### 2 Pohjan varantojen laskenta

$$\begin{aligned} \partial B_0 / \partial t &= -E_0 - H_b \cdot R_b(T, c, \dots) \\ \partial B_2 / \partial t &= -E_1 + E_{21} \\ \partial B_2 / \partial t &= -E_{21} - E_2 \\ \partial B_3 / \partial t &= 0 \end{aligned}$$

- $B_0$  = pohjaan hiljakkoin vajonnut varasto-osuus  
 $B_1$  = muutoin herkästi vapautuva varasto-osuus  
 $B_2$  = pohjalta vaikeasti vapautuva varasto-osuus  
 $B_3$  = pohjaan pysyvästi juuttunut varasto-osuus  
 $B$  =  $B_0 + B_1 + B_2 + B_3$   
 = tarkastellun muuttujan kokonaisvaranto pohjalla  
 $R_b$  = sedimentaatiotahti vedestä pohjalle  
 $E_i$  = osan  $B_i$  vapautumistahti pohjalta ( $i = 0, 1, 2$ )  
 $E_{21}$  = osan 2 vapautumistahti osaksi 1  
 $H_b$  = suoraan pohjan vaikutuksen alaisen vesikerroksen paksuus

### 3 Luontaisten (biogeokemiallisisten reaktioiden) muutosten laskenta

Vähentäminen, kuluminen, hajoaminen, hiipuminen

$$R_d(c) = -k_c \cdot c - \delta_c \cdot c^2$$

Sedimentoituminen ja vajoaminen (alkujaan)

$$R_s(c) = -(w_c + \sigma_c \cdot c) \cdot \partial c / \partial z$$

Sedimentoituminen (pohjakerroksen  $H_b$  syvyyskeskiarvona)

$$R_b(c) = -w_{cb} \cdot c / H_b - \sigma_{cb} \cdot c^2 / H_b$$

Vajoaminen (kokonaisvaikutuksena kerroksesta k alaspäin kerrokseen k+1)

$$H_k \cdot R_s(c) = -w_c \cdot c_k - \sigma_c \cdot c_k^2$$

Hapen ilmastuminen (pintakerroksen  $H_u$  syvyyskeskiarvona)

$$R_s(O_2) = w_a \cdot (O_{sat} - O_2) / H_u$$

$$w_a = w_{a0} + \sqrt{(w_a \cdot W)}$$

Hapen kuluminen ( $O_2$ )  $BOD_7$ :n vähentämisen mukana

$$R_l(O_2) = -k_{BOD} \cdot BOD_7 \cdot Brat$$

Pohjan vaikutus hapen kulumiseen (pohjakerroksen keskiarvona)

$$R_{lb}(O_2) = -SOD_7 / H_b$$

$k_c$  = ominaisuuden  $c$  (suoraviivainen) vähentämissuhteus vedessä

$\delta_c$  = ominaisuuden  $c$  neliöllinen vähentämissuhteus vedessä

$w_c$  = ominaisuuden  $c$  (suoraviivainen) vajoamisnopeus vedessä

$\sigma_c$  = ominaisuuden  $c$  neliöllinen vajoamisnopeus vedessä

$w_{cb}$  = ominaisuuden  $c$  (suoraviivainen) sedimentaationopeus pohjalle

$\sigma_{cb}$  = ominaisuuden  $c$  neliöllinen sedimentaationopeus pohjalle

$c$  = ominaisuuden  $c$  pitoisuus tai väkevyys vedessä

$O_2$  = veteen liuenneen hapen pitoisuus

$O_{sat}$  = liuenneen hapen kyllästyspitoisuus vedessä

$BOD_7$  = biologisen hapenkulutuksen ( $BHK_7$ :n) 7 vrk:n aikana vaikuttava väkevyys

$Brat$  = äärimmäisen, pitkän ajan  $BHK_7$ :n ja  $BOD_7$ :n suhde vedessä

$SOD$  = pohjasedimentin hapenkulutus

$w_a$  = hapen siirtoa ilmasta veteen kuvaava ilmastumiskerroin

$w_{a0}$  = ilmastumiskerroin tyynellä säällä

$w_{aw}$  = ilmastumiskertoimen neliön kasvun suhde tuulen nopeuteen

$H_k$  = laskennan  $k$ :nnen tarkasteluserroksen paksuus vedessä

$H_b$  = laskennan pohjakerroksen (alimmaisen vesikerroksen) paksuus

$H_u$  = laskennan pintakerroksen (ylimmän vesikerroksen) paksuus.

Kukin kerroin  $k$ ,  $\delta$ ,  $w$  ja  $\sigma$  voi riippua veden lämpötilasta seuraavasti:

$$k(O_2) = k(T_0) \cdot \theta^{T-T_0}$$

Jos  $\Theta$  muuttuu suoraan lämpötilan mukana, osuu vilkkauksen huippu kohtaan

$$T_{opt} = (1 - a_T) / b_T \cdot ^\circ C \quad \text{kun} \quad \Theta(T) = a_T + b_T \cdot T / ^\circ C$$

Edelleen

$$\rho(T) = \rho(4 ^\circ C) \cdot [1 - 6.8 \cdot 10^{-6} \cdot (T / ^\circ C - 4)^2]$$

$$O_{sat}(T) = [14.5532 - 0.3817 T / ^\circ C + 0.0054258 (T / ^\circ C)^2] \text{ mg/l}$$

## 4 Virtausnopeuksien laskenta

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla \cdot p / \rho_0 + \nabla \cdot (K \cdot \nabla) u - 2\Omega \times u - u \cdot \nabla u + F$$

$$p = p_a + g \cdot (1 - z) \cdot \rho_0 + g \int_z^n (\rho - \rho_0) dz$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\rho = \rho(T, s, c, \dots)$$

missä

$u, v$	= vaakatason virtausnopeudet x- ja y-suuntiin
$w$	= pystysuunnan virtausnopeus ylöspäin
$u$	= virtausnopeusvektori ( $u, v, w$ )
$t$	= aika
$x, y$	= vaakatason paikan osoittajat
$z$	= pystysuunnan paikka osoittaja (ylöspäin kasvavana)
	= veden pinnan korkeus
$h$	= veden syvyys (pinnankorkeuden perustasolta pohjaan)
$p$	= paine
$r$	= veden tiheys
$\bar{r}$	= veden keskimääräinen tiheys
$K_l$	= liikemäärän pitkittäinen sekoittumiskerroin
$K_s$	= liikemäärän poikittainen sekoittumiskerroin
$K_v$	= liikemäärän pystysuuntaisen sekoittumisen kerroin

$$K = \begin{bmatrix} K_l & K_s & K_v \\ K_s & K_l & K_v \\ K_{vs} & K_{vs} & K_{vl} \end{bmatrix} = \text{liikemäärän sekoittumismatriisi}$$

$W$	= maan pyörimisliikkeen kulmanopeus
$W_z$	= $\frac{1}{2}W \frac{1}{2} \sin j = W \cdot n$ pystysuuntainen osa
$j$	= maantieteellinen leveys (päiväntasaajalta pohjoiseen)
$f$	= $2 W_z = \text{Coriolis-kerroin}$
$p_a$	= ilmanpaine
$g$	= (maan vetovoiman aiheuttama) putoamiskiihtyvyys
$F$	= ulkoisten voimien vektori = $(0, 0, -g)$
$T$	= veden lämpötila
$s$	= veden suolapitoisuus

$$\begin{aligned} K_v \partial u / \partial z &= C_D |W| W \rho_{air} / \rho_0 && \text{pinnalla} \\ K_v \partial u / \partial z &= r(u, v, \dots) u && \text{pohjalla} \\ w &= 0 && \text{pohjalla} \\ r &= C_B \sqrt{(u^2 + v^2)} && \text{pohjalla} \\ (u, v, w)_n &= 0 && \text{rannoilla} \\ (u, v)_n &= Q / A_n && \text{jokisuilla} \end{aligned}$$

missä

$C_D$	= tuulen vastuskerroin
$W_x, W_y$	= vaakatason tuulennopeudet x- ja y-suuntiin
$W$	= tuulennopeuden vaakatason vektori ( $W_x, W_y, 0$ )
$r$	= ilman tiheys
$\bar{r}$	= pohjakitka
$C_B$	= pohjan vastuskerroin
$Q$	= jokivirtaama
$A_n$	= joen suun poikkipinta-ala
$(u, \dots)_n$	= rantaa vastaan kohtisuora virtausnopeus

## Liite 3. Kuvat

Kuva 1.	Tutkimusaluekartta. ....	10
Kuva 2.	Tutkimusalueen syvyyskäyrät ja Pohjanpitäjänlahden tilavuus-pinta- alakäyrä. ....	11
Kuva 3.	Päivittäiset virtaamat Mustionjoen suulla vuosina 1995 ja 1996. ....	12
Kuva 4.	Virtaamien kuukausikeskiarvoja Mustionjoen suulla vuosina 1995 ja 1996 sekä jaksolla 1980–1996. ....	12
Kuva 5 a-c.	Mustionjoen ainevirtaamat Pohjanpitäjänlahdelle vuosina 1995 ja 1996 sekä aikajaksolla 1978–1996 (kok.P ja kok.N) ja 1983–1996 (TOC). ....	14
Kuva 6.	Hapetuslaitteiden sijainti, vesinäytteiden havaintopaikat ja virtaus- mittauspaikat. ....	17
Kuva 7.	CTD-luotauspaikat. Oikealla CDT-luotauspaikat ja merenpohjan syvyys- profiili (m). X-akselilla etäisyys (km) pisteestä s11. ....	19
Kuva 8.	Kaavio pinta- ja pohjamittauspisteitä vastaavien virtausalojen jakokerto- mien ( $k_{pi}$ ja $k_{po}$ ) määrittysperiaatteista. ....	24
Kuva 9.	Kaavio pinta- ja pohjamittauspisteitä vastaavien virtausnopeuksien painokertoimien ( $\beta$ ) määrittysperiaatteista. ....	25
Kuva 10.	Pohjanpitäjänlahden vesi- ja ainetasekaavio. ....	26
Kuva 11.	Vedenlaatumallin rakenne-kaaviokuva. ....	30
Kuva 12.	Suolaisuuden, lämpötilan, tiheyden ja happipitoisuuden vaihtelu Pohjanpitäjänlahden syvänteessä (p10) vuosina 1995 ja 1996. ....	45
Kuva 13.	Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 5.4., 18.5., 13.7. ja 22.8.1995. ....	46
Kuva 14.	Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 29.8., 12.9., 26.9. ja 3.10.1995. ....	48
Kuva 15.	Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 10.10., 24.10., 31.10. ja 15.11.1995. ....	50
Kuva 16.	Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 26.3., 31.7., 12.8. ja 21.8.1996. ....	52
Kuva 17.	Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 3.9., 16.9., 1.10. ja 10.10.1996. ....	54
Kuva 18.	Suolaisuus, lämpötila, tiheys ja happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden näytteenotto- ja luotauslinjalla 22.10., 13.11. ja 9.12.1996. ....	56
Kuva 19.	TOC-pitoisuus havaintopaikan p10 päälly- ja alusvedessä sekä Mustionjoen suulla vuonna 1996. ....	58
Kuva 20.	TOC-pitoisuus ja suolaisuus havaintopaikalla p10 vuonna 1996. ....	59
Kuva 21.	TOC-pitoisuus ja suolaisuus havaintopaikalla p14 vuonna 1996. ....	60
Kuva 22.	TOC-pitoisuus eri havaintopaikoilla yhden metrin syvyydessä vuonna 1996. ....	61
Kuva 23.	Hiukkasmaisen hiilen pitoisuus (POC; $\text{mg m}^{-3}$ ) vesinäytteissä Mustionjoen suulla, Sällvikin syvänteessä (pinta 0–15 m, pohja 20–30 m) ja kynny- alueella Tammisaaren siltojen kohdalla vuoden 1992 tutkimuksessa. ....	62
Kuva 24.	Klorofylli a:n pitoisuus (0–4 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996. ....	63
Kuva 25.	Kokonaisfosforin pitoisuus (joessa 1 m ja merialueilla 0–5 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996. ....	65
Kuva 26.	Fosfaattifosforin pitoisuus (joessa 1 m ja merialueilla 0–5 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996. ....	66
Kuva 27.	Pohjanläheisen vesikerroksen (pohja-1 m) happi- ja fosfaattipitoisuus eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996. ....	67
Kuva 28.	Kokonaistypen pitoisuus (joessa 1 m ja merialueilla 0–5 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996. ....	69
Kuva 29.	Mineraalityypen ( $\text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$ ) pitoisuus (1 ja 5 m) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996. ....	70
Kuva 30.	Mineraaliravinteiden suhteet (epäorgaaninen typpi/fosfaatti fosfori) eri havaintokertoina vuosina 1995 ja 1996. ....	71



Kuva 31.	Salmen suuntainen (27°) virtausnopeus (3h-keskiarvo) Tammisaaren länsisalmissa 1,5 m syvyydessä 25.10.–8.12.1996. ....	72
Kuva 32.	Salmen suuntainen (27°) virtausnopeus (3h-keskiarvo) Tammisaaren länsisalmissa 4,5 m syvyydessä 25.10.–8.12.1996. ....	73
Kuva 33.	Salmen suuntainen (27°) virtausnopeus (3h-keskiarvo) Tammisaaren länsisalmissa 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä 15.–25.10.1995. ....	73
Kuva 34.	Salmen suuntainen (27°) virtausnopeus (3h-keskiarvo) Tammisaaren länsisalmissa 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä 26.10.–10.11.1996. ....	74
Kuva 35.	Vedenkorkeuden vuorokausikeskiarvot Hangon mareografilla vuosina 1995–1996. ....	74
Kuva 36.	Valuma-aluevirtaama Pohjanpitäjänlahdelle vuosina 1995–1996. ....	75
Kuva 37.	Meriveden lämpötila Tammisaaren länsisalmissa (3h-keskiarvo) 1,5 m ja 4,5 m 25.10.1995–8.12.1996. ....	75
Kuva 38.	Tammisaaren sillalla virtausmittareilla 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä mitatun johtokyvyn perusteella laskettu suolaisuus (kolmen tunnin keskiarvoja) ja Vitsteniltä (p12) 1 m ja 5 m syvyydeltä otetuista vesinäytteistä analysoitu suolaisuus jaksolla 1.7.–15.10.1996. ....	76
Kuva 39.	Tammisaaren länsisalmissa (4,5 m syvyydestä) 25.10.1995–8.12.1996 johtokyvyn perusteella laskettu suolaisuus (viikkokeskiarvot) ja Vitstenin (p12) vesinäytteistä (5 m syvyydestä) määritetty suolaisuus ( $R^2 = 0,55$ ). Johtokyky-anturi oli rikki 11.1.–10.4.1996. ....	76
Kuva 40.	Suolaisuus Tammisaaren länsisalmissa ja Vitsandin salmissa (3h-keskiarvo) 1,5 m syvyydessä 25.10.–8.12.1996. ....	77
Kuva 41.	Suolaisuus Tammisaaren länsisalmissa 4,5 m ja Vitsandin salmissa 8 m syvyydessä (3h-keskiarvo) 25.10.–8.12.1996. ....	77
Kuva 42.	Meriveden tiheys (viikkokeskiarvo) Tammisaaren salmissa 1,5 m ja 4,5 m syvyydessä ja Pohjanpitäjänlahden alusvedessä keskimäärin 25.10.1995–8.12.1996. ....	78
Kuva 43.	Virtauksen suuntajakaumat Tammisaaren länsisalmissa mittausjaksoittain. ..	79
Kuva 44.	Virtauksen spektri Tammisaaren länsisalmissa 1,5 m syvyydessä. ....	80
Kuva 45.	Tammisaaren salmien lasketun ja havaitun nettovirtaaman kuukausikeskiarvot 1.11.1995–8.12.1996. ....	81
Kuva 46.	Vaihdunnan komponentit Tammisaaren salmien koko poikkileikkauksessa 25.10.1995–8.12.1996; viikkokeskiarvot. ....	82
Kuva 47.	Vaihdunnan komponentit Tammisaaren salmien pohjanläheisessä poikkileikkauksessa 25.10.1995–8.12.1996; viikkokeskiarvot. ....	82
Kuva 48.	Alusvettä tiheimmän meriveden nettosisäänvirtaus pohjanläheisessä kerroksessa ja alusveden keskimääräisen happipitoisuuden vaihtelu Pohjanpitäjänlahdella 25.10.1995–8.12.1996. 1.1.–1.5. ei havaintoja tiheydestä. ....	83
Kuva 49.	Havaittujen ja regressiomalleilla laskettujen pintavirtauksien (nopeuksien aikasarjat; 1,5 m syvyydessä) vertailu Tammisaaren länsisalmissa (15.–31.12.1995). ....	86
Kuva 50.	Havaitut ja regressiomalleilla lasketut nettovirtaama-aikasarjat Tammisaaren salmien koko poikkileikkauksessa (24.10.1995–9.12.1996). ....	88
Kuva 51.	Havaitut ja regressiomalleilla lasketut nettovirtaama-aikasarjat Tammisaaren salmien pohjanläheisessä poikkileikkauksessa (24.10.1995–9.12.1996). ....	89
Kuva 52.	Havaitut ja regressiomalleilla lasketut suolaisuus-aikasarjat Tammisaaren salmien pohjanläheisessä poikkileikkauksessa (24.10.1995–9.12.1996). ....	89
Kuva 53.	Veden tiheys (päiväkeskiarvot) 16.10.–27.11.1997 Tammisaaren salmissa 4,5 m syvyydessä, Vitsandin salmissa 6 m syvyydessä sekä Tvärminnen edustalla 5 m ja 15 m syvyydessä. ....	90
Kuva 54.	Virtausnopeus (salmen suuntainen komponentti, päiväkeskiarvot) 16.10.–27.11.1997 Tammisaaren salmissa 4,5 m syvyydessä ja Vitsandin salmissa 6 m syvyydessä. ....	91
Kuva 55.	Suola- ja happitasemallin syöttötiedot 25.10.1995–8.12.1996. ....	92
Kuva 56.	Havaittu ja tasemallilla laskettu suolapitoisuus Pohjanpitäjänlahden päällys- ja alusvedessä 25.10.1995–8.12.1996. ....	93

Kuva 57.	Havaittu ja tasemallilla laskettu happipitoisuus Pohjanpitäjänlahden päällys- ja alusvedessä 25.10.1995–8.12.1996. ....	94
Kuva 58.	Kaavio; Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräinen suolatase. ....	96
Kuva 59.	Kaavio; Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräinen happitase. ....	98
Kuva 60.	Meriveden pinnan vaihtelun, valuma-aluevirtaaman, pohjoistuulen nopeuden ja itätuulen nopeuden vaikutus alusveden virtaamiin. ....	101
Kuva 61.	Meriveden pinnan vaihtelun, valuma-aluevirtaaman, pohjoistuulen nopeuden ja itätuulen nopeuden vaikutus päällysveden virtaamiin. ....	102
Kuva 62.	Meriveden pinnan vaihtelun, valuma-aluevirtaaman, pohjoistuulen nopeuden ja itätuulen nopeuden vaikutus koko poikkipinnan virtaamiin. ...	103
Kuva 63.	Mitatut ja lasketut happipitoisuudet havainto- ja tulostuspisteiden s2, s5, p9, p10, s6, s7, s9 ja s10 eri syvyyksiltä vuosina 1995–96. ....	107
Kuva 64.	Mitatut ja lasketut suolapitoisuudet havainto- ja tulostuspisteiden s2, s5, p9, p10, s6, s7, s9 ja s10 eri syvyyksiltä vuosina 1995–96. ....	108
Kuva 65.	Pumppauksen vaikutus mittaus- ja tulostuspisteiden s2, s5, p9, p10, s6, s7, s9 ja s10 eri vesikerrosten happipitoisuuksiin syksyllä 1995 ja 1996. ....	110
Kuva 66.	Pumppauksen vaikutus mittaus- ja tulostuspisteiden s2, s5, p9, p10, s6, s7, s9 ja s10 eri vesikerrosten suolapitoisuuksiin syksyllä 1995 ja 1996. ....	111
Kuva 67.	Pohjanpitäjänlahden laskenta-alueen pohjan syvyys ja pystyleikkauslinjat. Mixox-pumppauksen jyrkästi kerrostuneeseen seisovaan veteen aluksi aiheuttamia suolapitoisuuden pystyleikkauksia linjalta P–P sekä pumpuitta ja pumpattuna lasketut yhden tilanteen pystyleikkaukset. ....	112
Kuva 68.	Pystyleikkausten N–N ja P–P sekä neljännen, kuudennen ja kahdeksannen laskentakerroksen happipitoisuuden jakaumia lokakuun lopulla 1996 mixox-pumpuin ja pumppauksitta laskettuina. ....	113
Kuva 69.	Virtaaman viikkokeskiarvot (nettovirtaama) mittausjaksolla Tammisaaren salmien koko poikkileikkauksessa ja pohjanläheisessä kerroksessa erikseen. ....	115
Kuva 70.	Eri ympäristötekijöiden vaikutus veden vaihduntaan Tammisaaren (länsi) ja Vitsandin salmissa syksyn kerrostumattomaan aikaan virtausnopeuden ja suolaisuuden regressioyhtälöiden kvalitatiivisen tulkinnan perusteella. ....	117
Kuva 71.	Pohjanpitäjänlahden kerrostumisen ja vedenvaihdon vuodenaikaisvaihtelu. ....	121
Kuva 72.	Happipitoisuus Sällvikin syvänteessä 40:n m syvyydessä sekä Peltokosken virtaama vuosina 1990–1998. ....	122
Kuva 73.	Happipitoisuuden muutos kevät maksimista syysminimiin Sällvikin syvänteessä, 40 m:n syvyydessä sekä Peltokosken keskivirtaama elokuun alusta siihen saakka kunnes minimipitoisuus saavutetaan vuosina 1990–1998. ....	122
Kuva 74.	Sällvikin syvänteen happipitoisuuden muutoksen ja Peltokosken keskivirtaaman korrelaatio vuosina 1990–1998. ....	123
Kuva 75.	Alkutilven (1.9.–31.12.) maksimihappipitoisuus Sällvikin syvänteessä, 40 m:n syvyydessä sekä Peltokosken keskivirtaama syyskuun alusta siihen saakka kunnes maksimipitoisuus saavutetaan vuosina 1990–1998. ....	123
Kuva 76.	Sällvikin syvänteen alkutilven (1.9.–31.12.) happipitoisuuden maksimin ja Peltokosken keskivirtaaman korrelaatio vuosina 1990–1998. ....	124
Kuva 77.	Tasemallilla laskettu suolaisuus alusvedessä 25.10.1995–1.3.1997, kun alusvettä hapetetaan vuoden 1996 syksyllä ja jos ei olisi hapetettu. Harppauskerros on 10 m syvyydessä. ....	125
Kuva 78.	Tasemallilla laskettu happipitoisuus alusvedessä 25.10.1995–1.3.1997, kun alusvettä hapetetaan vuoden 1996 syksyllä ja jos ei olisi hapetettu. Harppauskerros on 10 m syvyydessä. ....	125
Kuva 79.	Alusveden suolapitoisuuden muutos 25.10.1995–1.3.1997 tasemallilla arvioituna, kun alusvettä hapetetaan vuoden 1996 syksyllä, ja harppauskerros on 10 m tai 15 m syvyydessä. ....	126
Kuva 80.	Alusveden happipitoisuuden muutos 25.10.1995–1.3.1997 tasemallilla arvioituna, kun alusvettä hapetetaan vuoden 1996 syksyllä, ja harppauskerros on 10 m tai 15 m syvyydessä. ....	126

Kuva 81.	Osa osalta lisättyjen vähennys-, kuormitus- ja kulutustekijöiden vaikutus havainto- ja tulostuspisteiden s2, s5, s4, p10, s6, s7, s9 ja s10 pohja-kerrosten happipitoisuuksiin 1995–1996. ....	128
Kuva 82.	Pohjanpitäjänlahden päällysveden viipymä ja pintakuorma 25.10.1995–31.12.1996. ....	130
Kuva 83.	Pohjanpitäjänlahden päällysveden reduktio 25.10.1995–31.12.1996, kun laskeutuvan hiukkasen laskeutumisnopeus on $4 \times 10^{-6}$ m vrk <sup>-1</sup> , $4 \times 10^{-5}$ m vrk <sup>-1</sup> , $4 \times 10^{-4}$ m vrk <sup>-1</sup> ja $4 \times 10^{-3}$ m vrk <sup>-1</sup> . ....	131
Kuva 84.	Päällys- ja alusveden kokonaisfosforin keskipitoisuus sekä kokonaisfosforisisältö Sällvikin syvänteellä syksyn 1995 havaintokerroilla. ....	134
Kuva 85.	Päällys- ja alusveden kokonaisfosforin keskipitoisuus sekä fosforisisältö Sällvikin syvänteellä syksyn 1996 havaintokerroilla. ....	135
Kuva 86.	Kokonaisfosforipitoisuus pintavedessä (1–5 m) eri havaintoasemilla syksyn 1996 havaintokerroilla. ....	136

## Liite 4. Taulukot

Taulukko 1.	Pohjanpitäjänlahteen laskevat vesistöt (lähde: Suomen ympäristökeskus, ympäristötietojärjestelmä). ....	9
Taulukko 2.	Mustionjoen Pohjanpitäjänlahdelle kuljettamat ainemäärät vuosina 1995 ja 1996 .....	13
Taulukko 3.	Jätevesikuormitus vuosikeskiarvoina vuosina 1995 ja 1996 .....	15
Taulukko 4.	Virtausmittausjaksot ja -paikat 25.10.1995–8.12.1996 sekä 16.10.–26.11.1997. ....	21
Taulukko 5.	Prosessimatriisi. Happimallin prosessit, prosessinopeudet ja vastaavat stökiometriset kertoimet. ....	28
Taulukko 6.	Happimallin muuttujat ja parametrit. ....	28
Taulukko 7.	Laskennassa käytettyjen valuma-alueen virtaamien $Q$ ( $m^3 s^{-1}$ ), Hangosta 12 tunnin välein mitattujen veden nousujen ja laskujen $Z+$ ja $Z-$ (cm ( $28-31$ vrk) $^{-1}$ ), tuulen nopeuden skalaari- ja vektorikeskiarvojen $W_{sc}$ ja $W_v$ ( $m s^{-1}$ ) sekä vektorikeskiarvon suuntien $S_u$ (asteina pohjoisesta myötäpäivään) kuukausikeskiarvot lokakuusta 1995 joulukuuhun 1996. ....	34
Taulukko 8.	Mallin syöttötietoina käytetyt jätevedenpuhdistamoiden $BOD_7$ -kuormitukset ( $tn\ vrk^{-1}$ ). ....	35
Taulukko 9.	$BOD_7$ :lle ja happipitoisuudelle ( $O_2$ ) 1995–96 käytetyt tulo- ja reuna-pitoisuudet. ....	37
Taulukko 10.	Perustuotannon ja klorofylli $a:n$ mittaustuloksista vuoden 1992 kevät-, kesä- ja syyskausille lasketut biomassan hajoamisesta johtuvat seitsemän vuorokauden hapenkulutustlisäykset $BOD_7$ . ....	38
Taulukko 11.	Kesien 1990–96 kevät-, kesä- ja syyskausien (80 vrk) klorofylli $a:n$ likimääräiset mittaueskiarvot ja niiden hajoamisesta aiheutuviksi johdetut likimääräiset seitsemän vuorokauden hapenkulutustlisäykset $dBOD_7/dt$ . ....	39
Taulukko 12.	Tammisaaren edustan ja Pohjanpitäjänlahden pohjilta vapautumaan syötetyt $BOD_7:n$ kuormitukset ja niitä vastaavat kuormitusvuot. ....	41
Taulukko 13.	Ilmastumisnopeus tuulen nopeuden funktiona .....	42
Taulukko 14.	Tammisaaren salmien pintavirtausta vastaavan poikkileikkausalan osuus koko poikkileikkauksesta ( $k_{pi}$ ) kalibroinnin perusteella jaksoittain. ....	80
Taulukko 15.	Tammisaaren salmien pinta- ja pohjavirtauksia vastaavat poikkileikkausalat ( $m^2$ ) sekä virtausnopeuden painokertoimet $\beta_{pi}$ ja $\beta_{po}$ kalibroinnin perusteella jaksoittain. ....	81
Taulukko 16.	Tammisaaren ja Vitsandin virtausten ja suolaisuuden regressiomallit – riippuvuus tuulesta, vedenkorkeusmuutoksista ja valuma-aluevirtaamasta (3h-keskiarvot). ....	85
Taulukko 17.	Kvalitatiivinen tarkastelu regressioyhtälöiden (kolmen tunnin keskiarvot, taulukko 16) perusteella valuma-aluevirtaaman, vedenkorkeusmuutoksen ja tuulen vaikutuksesta virtaukseen ja suolaisuuteen Tammisaaren länsisalmessa ja Vitsandin salmessa. ....	86
Taulukko 18.	Tammisaaren itäsalmen virtauksen regressiomalli- riippuvuus länsisalmen virtauksesta (3h-keskiarvot). ....	87
Taulukko 19.	Tammisaaren salmien virtaaman ja suolaisuuden viikkokeskiarvojen regressioyhtälöt. Keskinäiset riippuvuudet sekä riippuvuus vedenkorkeusmuutoksesta ja valuma-aluevirtaamasta .....	88
Taulukko 20.	Happi- ja suolatasemallin parametriarvot. ....	93
Taulukko 21.	Taseiden tarkastelujaksojen ajoitus .....	94
Taulukko 22.	Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräinen suolatas (tn $vrk^{-1}$ ). ....	95
Taulukko 23.	Pohjanpitäjänlahden alusveden keskimääräinen happitas (kg $vrk^{-1}$ ). ....	97

Taulukko 24.	Taulukossa 16 esitettyjen regressioyhtälöiden perusteella johdetut Tammisaaren salmien eri kerrosten virtaamien riippuvuudet veden korkeuden muutoksista, valuma-aluevirtaamasta ja tuulesta sekä 3D-mallin avulla lasketut riippuvuuslausekkeet. ....	99
Taulukko 25.	Veden laadun laskennan laskentakertoimia, -vakioita ja syöttötietoja. ....	104
Taulukko 26.	Tuulen, vedenkorkeuden muutoksen ja valuma-aluevirtaaman vaikutus meriveden sisäänvirtaukseen Tammisaaren salmien pohjakerroksessa virtausmittausten regressioyhtälöiden (taulukot 16 ja 19) ja poikki-leikkausten pinta-alatietojen (taulukko 15) perusteella. ....	118

# Kuvailulehti

Julkaisija	Suomen ympäristökeskus	Julkaisuaika Toukokuu 2000
Tekijä(t)	Olli Malve, Markku Virtanen, Leena Villa, Mauri Karonen, Heidi Åkerla, Anna-Stiina Heiskanen, Kalle-Matti Lappalainen ja Ralf Holmberg	
Julkaisun nimi	Pohjanpitäjänlahden syvänteessä vuosina 1995 ja 1996 toteutettu hapetuskokeilu; Alusveden vaihdunta sekä happi- ja suolataseet.	
Tiivistelmä	<p>Pohjanpitäjänlahti on voimakkaasti kerrostunut merenlahti, ja sen estuaarikierto on luonnostaan hidasku. Tammisaarellä olevan matalan kynnnyksen vuoksi. Alusveden happitila heikkeni 1990-luvun alussa synnyttäen tarpeen alusveden hapetuspumppaukseen. Vuosina 1995 ja 1996 kokeiltiin alusveden hapettamista Mixox-tyyppisellä laitteella ja tutkittiin Pohjanpitäjänlahden alusveden vaihduntaa ja happitilaa vesinäyttein ja virtausmittauksin. Aineistoa tutkittiin tilastollisesti sekä tasemallien ja 3D-virtaus-vedenlaatumallin avulla. Tulosten perusteella määritettiin alusveden vesi-, suola- ja happitaseet sekä pumppauksen vaikutus happitilaan ja ravinteiden siirtymiseen pohjalta levien käyttöön. Meriveden korkeusvaihtelu, valuma-aluevirtaama ja tuuli ohjasivat vaihduntaa Tammisaaren salmissa. Merivesi virtasi Tammisaaren salmissa keskimäärin <math>21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}</math> ulospäin, pohjanläheisessä kerroksessa <math>4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}</math> sisään. Jokivirtaama vaikutti ratkaisevasti Pohjanpitäjänlahden alusveden vaihduntaan ja happitilan kehitykseen. Keväällä jokivirtaama työnsi suolaisen meriveden kynnysalueen eteläpuolelle, ja vasta alkutalvella merivettä pääsi lahtialueen sisäosiin. Alkutalvella jokivirtaaman nousu hidasti edelleen alusveden happivaraston uusiutumista. Riippuvuus oli samanlainen kuin Tanskan salmissa ja Itämerellä. Ilmastomuutosennusteiden mukainen virtaaman kasvu talvella saattaa toteutuessaan aiheuttaa pysyvän muutoksen huonompaan suuntaan Pohjanpitäjänlahden happitilassa. Hapetuspumppauksella oli selvä alusveden happitilaa parantava vaikutus. Pumppauksen vaikutus alusveden happitaseseen oli noin kolmannes meriveden sisäänvirtauksen ja puolet vedessä ja pohjalla tapahtuvan hapenkulutuksen vaikutuksesta. Parhaimmillaan pumppaus nosti alusveden happipitoisuutta <math>1\text{--}2 \text{ mg l}^{-1}</math> ja alensi suolaisuutta <math>0,5\text{--}1 \text{ g kg}^{-1}</math>. Pumppauksen ei todettu lisäävän oleellisesti ravinteiden kiertoa pohjalta pinnalle levien käyttöön. Tutkimustulokset palvelevat jatkossa Pohjanpitäjänlahden alueen vesiensuojelun suunnittelua.</p>	
Asiasanat	Pohjanpitäjänlahti, Suomenlahti, Itämeri, estuaari, happivaje, hapetuspumppaus, ympäristövaikutusten arviointi, virtausmittaus, vesistöseuranta, taselaskenta, hydraulinen mallintaminen	
Julkaisusarjan nimi ja numero	Suomen ympäristö 377	
Julkaisun teema	Ympäristönsuojelu	
Rahoittaja/toimeksiantaja	Uudenmaan ympäristökeskus, Ympäristöministeriö, Suomen ympäristökeskus	
Projektiryhmään kuuluvat organisaatiot	Suomen ympäristökeskus, Uudenmaan ympäristökeskus, YVA Oy	
	ISSN	ISBN
	1238-7312	952-11-0644-1
	Sivuja	Kieli
	163	suomi
	Luottamuksellisuus	Hinta
	Julkinen	135 mk
Julkaisun myynti/jakaja	Oy Edita Ab, Asiakaspalvelu, PL 800, 00430 Edita puh. (09) 566 0266, telefax (09) 566 0380 sähköpostiosoite: asiakaspalvelu@edita.fi www-palvelin: http://www.edita.fi/netmarket	
Julkaisun kustantaja	Suomen ympäristökeskus, Uudenmaan ympäristökeskus	
Painopaikka ja -aika	Oy Edita Ab, Helsinki 2000	



# Presentationssblad

Utgivare	Finlands miljöcentral	Datum Maj 2000
Författare	Olli Malve, Markku Virtanen, Leena Villa, Mauri Karonen, Heidi Åkerla, Anna-Stiina Heiskanen, Kalle-Matti Lappalainen och Ralf Holmberg	
Publikationens titel	Syresättningsexperiment i Pojovikens undre vattenskiikt åren 1995-1996: En undersökning om faktorer som reglerar estuariet cirkulationen, vattenbytet i det undre skiktet samt syre- och saltbalansen.	
Sammandrag	<p>Pojoviken är en kraftigt skiktad havsvik, och estuariet cirkulationen blockeras av den grunda tröskeln vid Ekenäs. I början av 1990-talet var syreförhållandena synnerligen dåliga. I Pojoviken utfördes syresättningsexperiment under åren 1995 och 1996 med tre apparater av typen Mixox. Det klarades också vilka faktorer som reglerar vattenutbytet och syreförhållandena i det undre vattenskiiktet samt pumpningens effekter. För detta ändamål utfördes med korta mellanrum vattenkvalitets- och strömningsmätningar. Vatten-, salt- och syrebalansen undersöktes med både mätningar och modellering. En 3D-model av strömningarna och vattenkvaliteten utarbetades. De viktigaste faktorerna som reglerar strömningarna i sunden vid Ekenäs var vattenståndsvariationerna i havet, flödet från avrinningsområdet samt vinden. Under mätperioden strömmade det i genomsnitt <math>21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}</math> vatten ut ur sunden vid Ekenäs mot havet. Samtidigt strömmade det i de bottenära skikten i genomsnitt <math>4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}</math> havsvatten inåt. Flödet från åarna påverkar på ett avgörande sätt vattenutbytet i Pojovikens undre vattenskiikt och utvecklingen av syresituationen på hösten och förvintern. På våren trängde åvattenflödet det salta havsvattnet söder om tröskelområdet, och först på förvintern kunde tillräckligt med salt vatten strömma in till Pojoviken. I början av vintern kan ökningen av flödet från avrinningsområdet temporärt tränga det salta havsvattnet söder om Ekenäs. Förhållandet mellan avrinningen från land och vattenutbytet i viken påminner om förhållandena i de danska sunden. Om avrinningen vintertid ökar i södra Finland såsom man förutspår i en del klimatprognoser, kan det leda till en försämring av syretillståndet i Pojovikens undre vattenskiikt. Pumpningssyresättningen hade en tydlig positiv effekt på syretillståndet. Vid en närmare granskning av förhållandena i det undre vattenskiiktets syrebalans kan man konstatera, att pumpningen motsvarade en tredjedel av inflödet med havsvatten och hälften av syreförbrukningen i vattnet och botten. Man kunde genom pumpningar öka syrehalten i det undre skiktet som mest med <math>1 - 2 \text{ mg l}^{-1}</math>, medan salthalten minskade med <math>0,5 - 1 \text{ g kg}^{-1}</math>. Det kunde inte konstateras att syresättningspumpningarna skulle ha ökat näringsalts cirkulationen från botten till ytan. Resultaten från dessa undersökningar kan i fortsättningen användas i planeringen av vattenskyddet i Pojoviksområdet.</p>	
Nyckelord	Pojoviken, Finska viken, Östersjön, estuarium, syreunderskott, syresättningspumpning, miljökonsekvensbedömning, strömningsmätning, vattenövervakning, beräkning av balansvariabler, hydraulisk modellering	
Publikationsserie och nummer	Suomen ympäristö 377 (Miljön i Finland 377)	
Publikationens tema	Miljövård	
Finansiär/uppdragsgivare	Nylands miljöcentral, Miljöministerium, Finlands miljöcentral	
Organisationer i projektgruppen	Finlands miljöcentral, Nylands miljöcentral, YVA Oy	
	ISSN	ISBN
	1238-7312	952-11-0644-1
	Sidantal	Språk
	163	finska
	Offentlighet	Pris
	Offentlig	135 mk
Beställningar/distribution	Oy Edita Ab, Kundservice, PL 800, 00430 Edita tel. (09) 566 0266, telefax (09) 566 0380 e-mail: asiakaspalvelu@edita.fi www-server: <a href="http://www.edita.fi/netmarket">http://www.edita.fi/netmarket</a>	
Förläggare	Finlands miljöcentral, Nylands miljöcentral	
Tryckeri/tryckningsort och -år	Oy Edita Ab, Helsingfors 2000	

# Documentation page

Publisher	Finnish Environment Institute	Date May 2000
Author(s)	Olli Malve, Markku Virtanen, Leena Villa, Mauri Karvonen, Heidi Åkerla, Anna-Stiina Heiskanen, Kalle-Matti Lappalainen and Ralf Holmberg	
Title of publication	Artificial Oxygenation Experiment in Hypolimnion of Pojo Bay Estuary in 1995 and 1996: Factors Regulating Estuary Circulation and Oxygen and Salt balances	
Abstract	<p>Pojo Bay is a steeply stratified estuary in the Gulf of Finland, Baltic Sea. Due to a shallow threshold, its estuary circulation is weak. In the early 1990's, the oxygen conditions deteriorated. Parallely with an artificial oxygenation experiment in 1995 and 1996, a research project was launched, with the objective to study the water exchange of the hypolimnion and the effects of the oxygenation. Frequent measurements of water quality and currents were made. The water, salt and oxygen balances were determined and a 3D-hydrodynamic water-quality model was constructed. The sea level variation, the outflow from the catchment and the wind regulated current patterns in the narrows at Tammisaari. The average flow outwards was <math>21 \text{ m}^3\text{s}^{-1}</math>. Near the bottom, however, there was a flow of <math>4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}</math> inwards to the estuary. The catchment flow had a decisive effect on the water exchange of the hypolimnion in the estuary. During the spring the catchment flow pushed the saline water south beyond the threshold area and the saline water could not enter into the inner estuary until early winter. In early winter, the increased catchment flow sometimes prevented the inflow of saline water. The water exchange of the hypolimnion of the Pojo Bay estuary is similarly dependent on the catchment flow as is the wintertime saline water inflow through the Danish Sounds. If the wintertime mean discharge in southern Finland will increase as it was suggested by climate change prognosis, oxygen conditions in hypolimnion of the Pojo Bay will deteriorate. The oxygenation had a distinct positive effect on the oxygen regime. Compared with other components of the hypolimnion oxygen balance, oxygenation was about one third of the oxygen inflow with saline water and about half of the oxygen consumption in the water and in the bottom. Oxygenation increased the oxygen concentration by <math>1 - 2 \text{ mg l}^{-1}</math> at its best, while the salinity was decreased by <math>0,5 - 1 \text{ g kg}^{-1}</math>. It could not be found that oxygenation pumping would increase the circulation of nutrients from the bottom to the surface layer. The results acquired will be applied in developing the water pollution control in the Pojo Bay.</p>	
Keywords	Pohjanpitäjänlahti, the Gulf of Finland, the Baltic Sea, estuary, oxygenation pumping, environmental impacts assessment, current measurement, water monitoring, computing of balances, hydraulic modelling	
Publication series and number	Suomen ympäristö 377 (The Finnish Environment 377)	
Theme of publication	Environmental protection	
Financier/ commissioner	Uusimaa Regional Environment Centre, Ministry of the Environment, Finnish Environment Institute	
Project organization	Finnish Environment Institute, Uusimaa Regional Environment Centre, YVA Oy	
For sale at/ distributor	ISSN	ISBN
	1238-7312	952-11-0644-1
	No. of page	Language
	163	Finnish
	Restrictions	Price
For sale at/ distributor	For public use	135 FIM
	Edita Ltd, tel. +358 9 566 0266	
	Oy Edita Ab, Asiakaspalvelu, PL 800, 00430 Edita	
	e-mail: asiakaspalvelu@edita.fi	
	www-server: <a href="http://www.edita.fi/netmarket">http://www.edita.fi/netmarket</a>	
Financier of publication	Finnish Environment Institute, Uusimaa Regional Environment Centre	
Printing place and year	Edita Ltd, Helsinki 2000	







## YMPÄRISTÖN- SUOJELU

Pohjanpitäjänlahden syvänteessä vuosina 1995 ja 1996  
toteutettu hapetuskokeilu

- veden vaihdunta sekä happi- ja suolataseet

Pohjanpitäjänlahden alusveden happitila on ollut jo pitkään ajoittain heikko, heikoimmillaan 1990-luvun alussa. Happitilan parantamiseksi kokeiltiin vuosina 1995 ja 1996 hapekkaan pintaveden pumppaamista alusveteen. Samanaikaisesti tutkittiin toimenpiteen vaikutusta alusveden luontaiseen vaihduntaan sekä happi- ja suolataseisiin. Vaikutusten arviointi perustui poikkeuksellisen kattavaan vesistöhavainnointiin sekä taseiden ja virtausten laskentaan.

Hapetuspumppauksella havaittiin olevan selvä happitilaa parantava vaikutus, ja se soveltuu hyvin Suomenlahden rannikon hapenpuutteesta kärsivien syvänealueiden hoitoon.

Valuma-alueelta virtaava makeavesi esti keväällä ja alkutalvesta hapekkaan meriveden sisäänvirtauksen Tammisaaren matalissa salmissa hidastaen Pohjanpitäjänlahden sisäosissa alusveden happivarojen uusiutumista. Pohjanpitäjänlahden alusveden vaihdunta toimii samalla lailla kuin Itämeren vaihdunta Tanskan salmissa vaikka mittasuhteet ovat erilaiset.

ISBN 952-11-0644-1

ISSN 1238-7312

Oy EDITA Ab  
PL 800, 00043 EDITA, vaihde (09) 566 01  
ASIAKASPALVELU  
puh. (09) 566 0266, telefax (09) 566 0380  
EDITA-KIRJAKAUPAT HELSINGISSÄ  
Annankatu 44, puh. (09) 566 0566  
Eteläesplanadi 4, puh. (09) 662 801



9 789521 106446